

343
B57

Т Р У Д Ы

СИБИРСКОГО МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО
ИНСТИТУТА

ПРОФЕССОР Л. П. ВЛАДИМИРОВ

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ИНТЕНСИФИКАЦИИ МАРТЕНОВСКОГО
ПРОЦЕССА

771472

НАУЧНАЯ РЕДАКЦИЯ

ТРУДОВ СИБИРСКОГО МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

- Проф.-докт. Н. А. Костылев — металлургия чугуна
- Инж. Д. С. Хорунов
- Проф. А. П. Владимиров — металлургия стали
- Проф. Ю. В. Грдина — металловедение
- Инж. Н. Н. Мокин
- Инж. Т. М. Голубев — прокатное дело
- Доц. А. И. Сахаров
- Доц. А. И. Смирнов — литейное дело
- Инж. П. С. Болтенко
- Инж. Э. Х. Шамовский — сварочное дело
- Проф. В. П. Марков — химия
- Инж. А. М. Ручушкин
- Доц. Я. С. Воложин — огнеупорные материалы
- И. о. проф. М. М. Слиозберг — автоматика и телемеханика

Ответственный редактор
инж. А. Я. Дехтярь

ТРУДЫ

СИБИРСКОГО МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

Кафедра металлургии стали

ПРОФЕССОР Л. П. ВЛАДИМИРОВ

34.3
0 57

хр/кр/

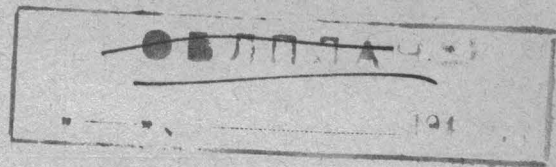
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ МАРТЕНОВСКОГО ПРОЦЕССА

632
283623
2
532



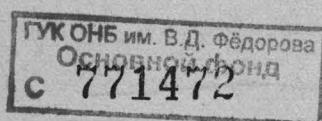
386389

7кд



ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
1. Введение	3
2. Продолжительность расплавления и содержание в металле углерода по расплавлению	4
3. О связи между продолжительностью кипения ванны и качеством металла	11
4. Интенсивность обезуглероживания металла в мартеновских печах . .	13
5. О взаимодействии металла и шлака	30
6. О предварительном раскислении металла	39
7. О раскислении металла и шлака	40
8. Комбинированный способ доводки стали в мартеновской печи . . .	42



Технический редактор Е. И. Бутакова.
Тираж 350 экз., печ. лист. $2\frac{3}{4}$, автор. $4\frac{1}{4}$.
Сдано в набор 29/X-37 г.
Подписано к печати 3/1-38 г.
Статформат 148×210.
Печатных знаков 61312 в одном печ. л.
Новосибирск, типография № 1 Облисполкома. Зак. 3924.
Уполобллита № 6291 от 3/1 1938 г.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ МАРТЕНОВСКОГО ПРОЦЕССА

1. ВВЕДЕНИЕ *

Сущность мартеновского процесса сводится к следующему:

- 1) к загрузке печи шихтой и ряду механических манипуляций, совершаемых во время плавки;
- 2) к удалению из шихты химическим путем содержащихся в ней примесей (главным образом углерода) и
- 3) к поднятию температуры металла до такой степени, при которой он может быть свободно залит в изложницы.

Соответственно этому интенсификация мартеновского процесса может быть мыслима в трех направлениях:

а) в направлении ускорения механических операций по ведению плавки (выпуск, загрузка печи, заделка отверстия, заправка откосов, заправка простенков и порогов, заливка чугуна, спуск шлака, введение добавок, разделка ложных порогов, разделка выпускного отверстия);

б) в направлении ускорения протекания химических реакций: окисления, раскисления и ошлакования отдельных примесей и частично — диссоциации их окислов;

в) в направлении ускорения прогрева металла в печи.

Все эти три пути имеют неразрывную связь между собою, и попытки внести изменение в одном направлении могут вызвать соответствующие изменения и в других. Так, например, изменением порядка и скорости завалки нетрудно добиться изменения в теплопоглощении шихты в период расплавления; это связано с изменением в продолжительности расплавления шихты; последнее в свою очередь связано с тем количеством примесей, которое успеет выгореть за период расплавления. Таким образом, механические манипуляции влияют на тепловую работу печи, последняя — на характер химических процессов и т. п.

Тем не менее в каждом из этих направлений можно сделать еще очень многое для увеличения интенсивности мартеновского процесса.

Опуская в настоящей статье вопросы, связанные с интенсификацией мартеновского процесса при помощи ускорения механических

* Настоящая работа представляет авторизованную переработку доклада, прочитанного автором на всеуральской конференции мартеновцев по обобщению стахановского опыта работы (июнь 1936 г.).

операций и теплотехнических методов повышения скорости нагрева ванны, как подлежащих особому рассмотрению, остановимся лишь на изучении вопросов интенсификации физико-химических процессов при плавке стали в печи.

С физико-химической точки зрения мартеновская плавка представляет процесс окисления примесей шихты и раскисления образующейся при этом закиси железа, а также процесс ошлакования образующихся окислов и распада их.

Наиболее важными моментами плавки с этой точки зрения следует считать:

- а) процесс обезуглероживания металла,
- б) взаимодействие металла со шлаками,
- в) предварительное раскисление металла,
- г) раскисление металла и шлака.

Рассмотрим, каждый из этих вопросов в отдельности.

2. ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ РАСПЛАВЛЕНИЯ И СОДЕРЖАНИЕ В МЕТАЛЛЕ УГЛЕРОДА ПО РАСПЛАВЛЕНИИ

С развитием рудного процесса в печах большой мощности с глубокой металлической ванной продолжительность как всего мартеновского процесса в целом, так и отдельных его периодов стала более значительной. Удлинение периода расплавления вело, как правило, к тому, что количество примесей, выгорающих за период расплавления, становилось относительно большим. Это не всегда обеспечивало достаточное количество примесей, главным образом углерода, для нормального ведения процесса кипения, так как ненагретый еще в достаточной степени металл, имеющий к концу расплавления низкое содержание углерода, почти не кипел и тем самым не способствовал более быстрому прогреву металла, лучшей его прокипяченности, удалению газов и шлаковых включений.

Такое перемягчение плавок вызывалось наряду с прочими факторами медленностью прогрева и относительно высоким количеством руды, задаваемой в завалку*.

Стремясь ослабить значительное выгорание углерода в период расплавления, практики нередко резко уменьшали количество руды, идущей в завалку, и, в отдельных случаях, это приводило к противоположным результатам — весьма крепкому расплавлению металла с высоким содержанием углерода в нем.

Высокое содержание углерода в металле по расплавлению хотя и давало возможность более нормально провести процесс (в смысле получения металла надлежащих качеств), но оно вело к неизбежным затяжкам процесса, уже не в связи с неизбежными доливками или подсадками чугуна, а в связи с увеличением времени, необходимого на сам по себе процесс выгорания углерода.

Расчет шихты, в котором учитывается лишь общее содержание

* В первые годы эксплуатации больших печей это происходило из-за недоучитывания необходимости уменьшать количество руды, идущей в завалку при работе со спуском шлака.

углерода в завалке, не дает представления об относительных количествах углерода, которые окисляются в периоды расплавления и кипения. Соотношение же их зависит от целого ряда факторов и, в первую очередь, от термической мощности печи. Чем лучше, при прочих равных условиях, питается теплом металлическая ванна, тем менее продолжителен период расплавления, тем меньше выгорит углерода за этот период.

Естественно, что первая задача нормального ведения процесса заключается в достижении правильного соотношения между количеством углерода, содержащимся в шихте, в металле по расплавлению и в конечном металле, с одной стороны, и продолжительностью периодов расплавления и кипения ванны — с другой. Количество же руды, задаваемой в завалку, должно быть лишь функцией этого соотношения.

Соотношение это не может быть заранее установленным, так как дело здесь не в относительных количествах углерода, окисляющегося в оба периода (расплавления и кипения), а в том содержании углерода в металле, с которого в сущности должен начаться процесс кипения*.

Асинхронность двух главнейших процессов: обезуглероживания металла и нагрева его до температуры выпуска — есть лишь результат неполучения наиболее оптимального содержания углерода в металле по расплавлению шихты.

Фиг. 1, 2 и 3 обнаруживают весьма значительные колебания содержания в металле углерода по расплавлению на трех заводах: Магнитогорском, Дзержинском и Кузнецком. Все три диаграммы составлены при обследовании, по данным журнальных записей, и относятся к плавкам, последовательно проводившимся на протяжении приблизительно двух-трех месяцев на одной из печей этих заводов.

Число нормально проведенных плавков на всех трех заводах чрезвычайно невелико; размах же по углероду весьма значителен — от 0,06 С до 2,0 проц. С и даже, в отдельных случаях, выше.

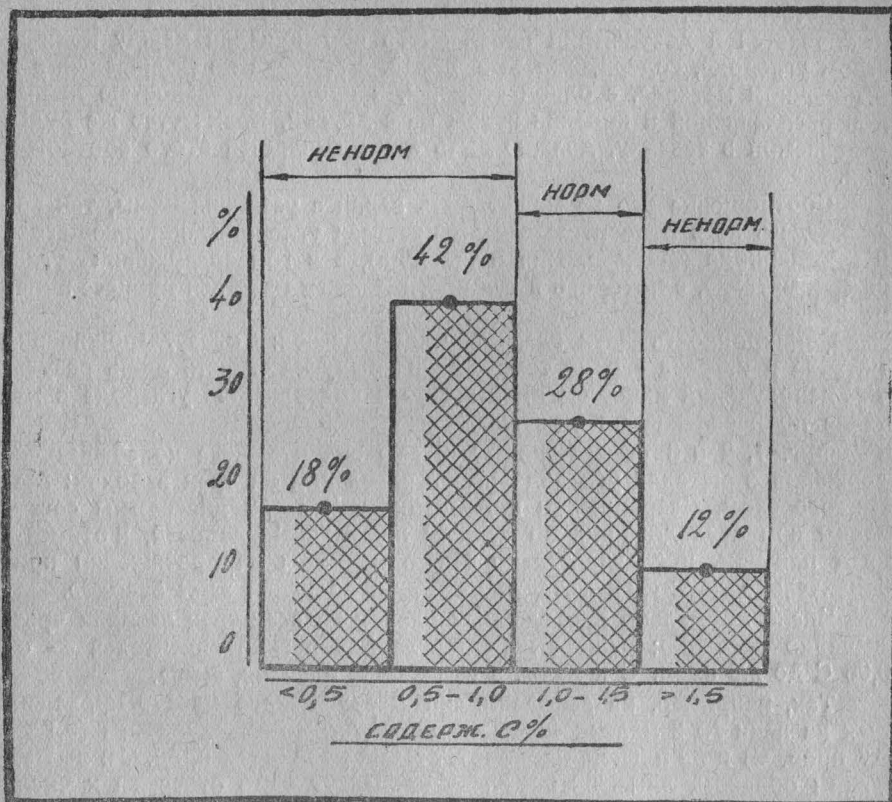
Так, например, на заводе имени Дзержинского из 170 проведенных на печи № 2 плавков 42 были недопустимо перемягчены (0,1 — 0,7 проц. С) и 39 плавков, наоборот, весьма крепки (1,5 проц. С и выше). Таким образом, лишь 52 проц. плавков могут быть отнесены к числу «допустимых» по содержанию углерода в металле по расплавлению. Не лучше дело обстоит и на Магнитогорском заводе, где число нормальных плавков по этому признаку составило лишь 28 проц. Зависимость содержания в металле углерода по расплавлению от продолжительности периода расплавления представлена на фиг. 3 (см. стр. 8) на примере печи № 6 Кузнецкого завода.

На диаграмме ясно видно, как с увеличением продолжительности периода расплавления максимум частоты плавков перемещается ко все более низким значениям углерода в металле.

Можно установить, как правило, что наиболее перемягченные, равно как и наиболее крепкие плавки, — это плавки наиболее затяжные, дающие наименьшую часовую производительность печи (см.

* Подробнее по этому вопросу см.—проф. Л. П. Владимиров. Обезуглероживание металла в печах с глубокой ванной „Теория и практика металлургии“ 1936 г. № 2.

табл. 1 и фиг. 4). Эти плавки всегда связаны с необходимостью подсадки по ходу процесса чугуна или руды, а чаще и того и другого. Эти подсадки (а иногда и доливки жидкого чугуна) нарушают ход процесса, выбивают печь из графика и, в свою очередь, служат причиной несвоевременного обслуживания печей ковшами или механизмами из-за нарушения графика.



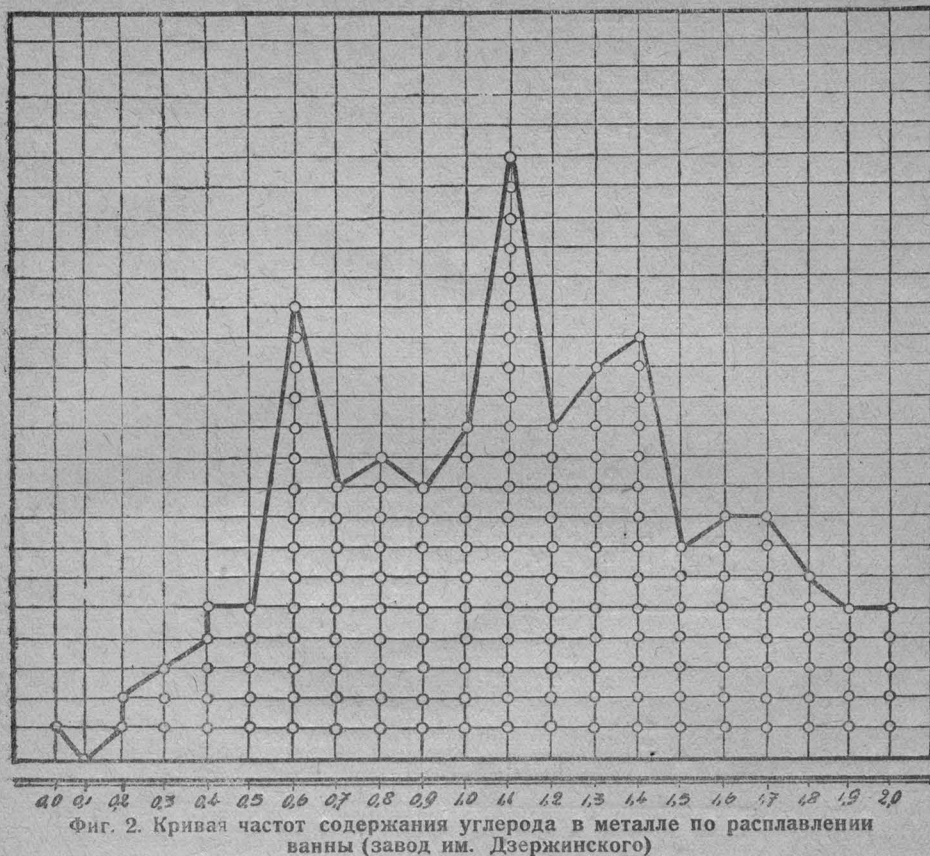
Фиг. 1. Частота случаев получения различного содержания углерода в металле по расплавлению ванны (Магнитогорский завод)

Таблица 1

Углерод по расплавлению в %	0,1—0,4	0,5—0,8	0,9—1,2	1,3—1,6
Производительность тонн/час	10,7	10,8	11,0	10,8
Число плавов	17	64	29	27

Таким образом, один из основных рычагов повышения интенсивности мартеновского процесса — это путь получения наиболее оптимального содержания в металле углерода по расплавлению ванны, с тем чтобы дальнейший процесс кипения ванны представлял собою синхронный процесс нагрева ванны и обезуглероживания ее.

Однако было бы глубоко ошибочным устанавливать раз навсегда какие-либо определенные пределы содержания углерода в металле по расплавлению. Эта величина не может быть тождественной для раз-



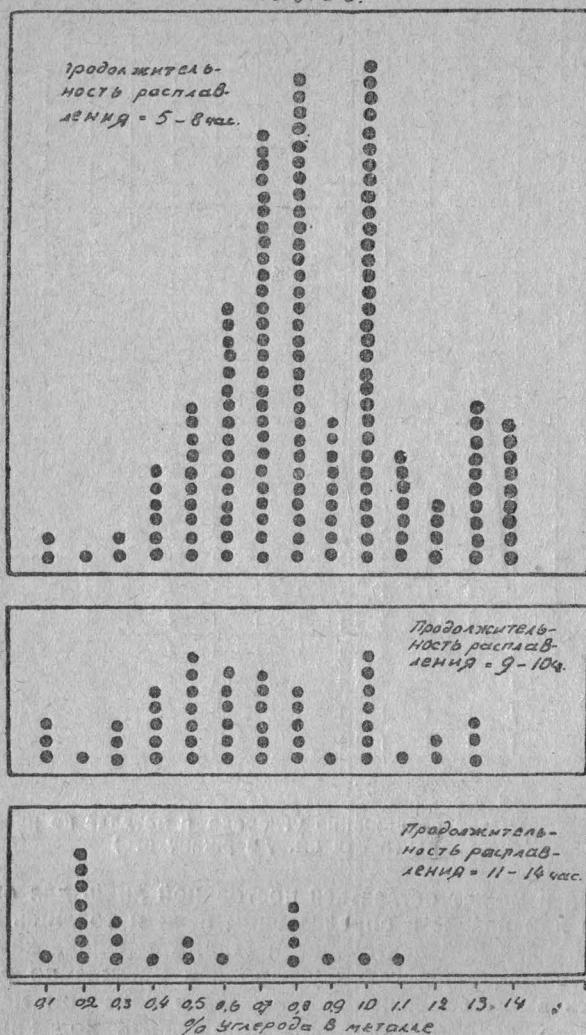
личных печей и может оставаться постоянной лишь для определенной марки стали при плавке в определенной печи и то лишь в период ее наиболее продуктивной деятельности (т.е. в середине кампании).

Действительно, содержание углерода в металле по расплавлению должно быть выше содержания углерода в конечном металле на то его количество, которое обеспечит нормальный ход кипения ванны в течение всего периода нагрева ванны — от температуры расплавления шихты до температуры выпуска металла из печи.

Однако это последнее окажется иным при различной способности печей прогреть металл. Для печей с глубокой ванной интенсивность прогрева металла всегда уступает интенсивности обезуглероживания его. Поэтому наиболее правильным будет выразить содержание углерода в металле по расплавлению не как функцию скорости выгорания углерода, а как функцию от продолжительности периода кипения ванны. Последняя, в свою очередь, является функцией термической мощности печи.

Скорость же выгорания углерода должна при этом изменяться в узких пределах, обеспечивая лишь достаточно энергичное кипение ванны.

Печь № 6.

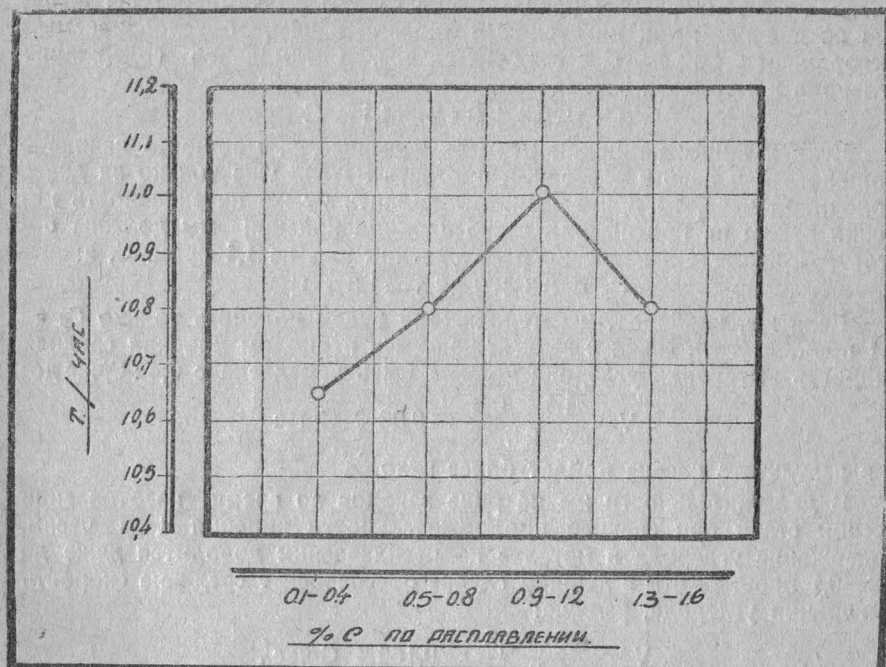


Фиг. 3. Зависимость между продолжительностью расплавления и содержанием углерода в металле по расплавлении ванны (Кузнецкий завод)

Если обозначить содержание углерода в металле по расплавлению через C_p , содержание углерода в конечном металле — через C_k , продолжительность периода кипения ванны — через t и среднюю скорость выгорания углерода в период кипения ванны — через V , то оптимальное содержание углерода в металле по расплавлении шихты может быть выражено следующим образом:

$$C_p = C_k + V \cdot t$$

Здесь — C_k для одного и того же металла постоянная величина, t — есть функция термической мощности печи, которая для одной и той же печи при данном режиме меняется с возрастом ее и v — та средняя скорость выгорания углерода, которая обеспечивает достаточно энергичное кипение ванны в течение всего периода t .



Фиг. 4. Кривая зависимости производительности печи от содержания в металле углерода по расплавлению ванны

В случае, если действительное содержание углерода в металле по расплавлении отклоняется от оптимального, то плавка может быть проведена относительно нормально лишь при условии соответствующего изменения средней скорости выгорания углерода. Так, для крепких плавков средняя скорость выгорания углерода должна быть повышена, что следует из соотношения:

$$v = \frac{C_p - C_k}{t},$$

в котором значение числителя дроби с увеличением C_p возрастает (в противном случае длительность плавки неизбежно возрастет). Практически это может быть достигнуто относительно большим насыщением ванны железными окислами и поднятием температуры в печи.

Наоборот, при перемягчении плавку в большинстве случаев уже не удастся провести вполне нормально, так как если среднюю скорость выгорания углерода и удастся понизить до крайности, то качество непрокипяченного металла оказывается совершенно неудовлетворительным, и для повышения интенсивности кипения в металле

подсаживают обычно чугун, что вызывает большей частью задержки в выпуске плавов, ибо подсадки, как правило, делаются со значительным опозданием.

При изготовлении, например, осевой стали с содержанием углерода = 0,3 проц. С, в печи, которая в состоянии поднять температуру металла от температуры расплавления шихты до температуры выпуска за два часа, при интенсивном кипении ванны, обусловливаемым выгоранием 0,4 проц. С в среднем за час, оптимальное содержание углерода в металле по расплавлению должно быть:

$$C_p = 0,3 + 0,4 \cdot 2 = 1,1\% \text{ С}$$

Если к концу кампании печи ее термическая мощность начинает понижаться и печь в состоянии прогреть металл уже только за два с половиной часа, то при желании сохранить ту же интенсивность кипения ванны на протяжении всего периода кипения мы должны обусловить наличие в ванне по расплавлению уже не 1,1 проц. С, а:

$$C_p = 0,3 + 0,4 \cdot 2,5 = 1,3\% \text{ С}$$

Если же, наоборот, мы попрежнему будем получать только $C_p = 1,1$ проц. С, то в связи с затягивающимся периодом кипения средняя скорость выгорания углерода должна быть замедлена с 0,4 : С/час до:

$$V = \frac{1,1 - 0,3}{2,5} = 0,32\% \text{ С/час}$$

и в результате плавка пойдет более вяло.

В действительности же на ряде заводов во время изготовления осевой стали при средней продолжительности кипения $t = 3$ часам, содержание углерода в металле по расплавлению доводится даже до 0,8—0,7 проц. С, что в лучшем случае обеспечивает среднюю скорость выгорания углерода, равную:

$$V = \frac{0,8 - 0,3}{3} = 0,166\% \text{ С/час,}$$

или, соответственно, 0,0028 проц. С в минуту. В результате, качество металла оставляет желать, конечно, много лучшего.

Получающееся практически содержание углерода в металле по расплавлению зависит, главным образом, от двух факторов:

- 1) от продолжительности расплавления,
- 2) от количества руды, заданной в завалку.

При устойчивой шихте (процент чугуна, состав его) и отрегулированном термическом режиме, достижение оптимального содержания углерода в металле по расплавлению шихты производится путем регулирования задаваемого в завалку количества руды. Если до окончательного расплавления ванны производится спуск шлака, то количество его, оставшееся в печи, и состав его также могут влиять на содержание в металле углерода по расплавлению.

Оба этих фактора производственными часто не учитываются. К концу кампании печи, в связи с разгаром газовых пролетов или зашлакованием насадок, когда термическая мощность печи понижается, продолжительность расплавления шихты возрастает, в связи с чем для достижения того же содержания углерода в металле по расплавлению количество заданной в завалку руды должно быть снижено. Но при понижении термической мощности печи неизбежно снижается и скорость прогрева металла, в связи с чем для достижения той же

интенсивности кипения содержание углерода в металле по расплавлению должно быть выше, чем в середине кампании печи, и, следовательно, количество заданной в завалку руды должно быть еще более сниженным.

Наоборот, всякое изменение в работе печи, ведущее к повышению ее термического режима, должно сопровождаться поэтому увеличением количества железной руды, идущей в завалку.

Таким образом к расчетам шихты, дающим лишь стехиометрические соотношения составляющих шихты, следует присовокуплять несложные подсчеты по типу приведенных выше, где стехиометрические соотношения составляющих увязываются с характером работы печи.

Резюмируя приведенные выше соображения, приходим к следующим выводам:

Ради устранения неполадок при проведении плавов, вызываемых асинхронностью процессов нагрева металла и обезуглероживания его, процесс плавки необходимо организовать так, чтобы нормальный ход кипения ванны был обеспечен в течение всего периода прогрева металла. Это может быть достигнуто при расплавлении металла на каком-то определенном оптимальном количестве углерода. Определение такого оптимального количества углерода в металле должно производиться в зависимости от продолжительности периода кипения, которая, в свою очередь, для печей с глубокими ваннами зависит от термической мощности и термического режима печи. Средняя скорость выгорания углерода, желательная для процесса, может быть при этом установлена заранее.

Получение оптимального количества углерода в металле при расплавлении шихты необходимо обеспечить согласованием идущего в завалку количества руды с термической мощностью и режимом печи.

3. О СВЯЗИ МЕЖДУ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬЮ КИПЕНИЯ ВАННЫ И КАЧЕСТВОМ МЕТАЛЛА

При проведении стахановцами рекордных плавов со стороны ряда металлургов раздавались возражения против сокращения периода кипения, так как это должно было вести якобы к ухудшению качества металла*.

Такие возражения основаны на явном недопонимании многими металлургами смысла и задач периода кипения мартеновской плавки. Качество металла, т.е. его раскисленность, газонасыщенность, содержание в нем шлаковых включений и т. п., не является функцией продолжительности кипения плавки. Удаление газов и шлаковых включений, равно как и хороший прогрев и раскисленность металла связаны лишь с активностью металла во время кипения и той поддержкой металла при нейтральной или восстановительной атмосфере в печи, которая способствует коагуляции диспергированных в металле частиц шлака и газов и всплыванию их в шлак.

* На Кузнецком заводе такие возражения практически свелись к явному саботажу стахановского движения в начале 1936 г., а орудовавшие тогда в цехе и в центральной лаборатории завода вредители сделали немало для дискредитации отдельных стахановцев и для срыва всего движения в целом.

Чем интенсивнее кипение, тем больше частиц металла выбрасывается в шлак и, наоборот, тем больше частичек шлака эмульсируется в металле. Этот результат механического процесса «кипения» ванны вызывает еще более усиленное кипение ее в связи с увеличением поверхности соприкосновения системы металл-шлак и усилением интенсивности реакций. Таким образом, до тех пор, пока идет кипение ванны, она содержит в себе эмульсированные частички шлака и газов, и весьма наивно звучит утверждение многих авторов статей и книг, будто в процессе кипения ванны металл относительно легче освобождается от шлаковых и газовых включений. Такое освобождение металла от растворенных, эмульсированных и просто попавших в металл частиц во время кипения ванны, конечно, имеет место, но наряду с ним имеет место и дальнейшее возникновение и растворение в металле газов, дальнейшее вовлечение частичек шлака в металлическую среду, и этот процесс длится до тех пор, пока не прекращается кипение ванны.

В самом деле, до тех пор, пока идет кипение ванны, образование окиси, углерода неминуемо. Последняя либо растворяется в металле, либо, если металл уже пересыщен ею, выделяется из раствора и постепенно прорывается через слой металла и шлака в газовую фазу, либо, наконец, отдельными пузырями застревает под коркой металла или шлака, если вследствие их повышенной вязкости, поверхностное натяжение этих жидкостей имеет значительную величину. Так как все имеющиеся данные говорят в пользу того, что насыщение металла окисью углерода происходит задолго до того, как заканчивается кипение ванны, то следует считать, что в любой данный момент кипящая ванна содержит как растворенную в ней, так и избыточную и удаляющуюся в газовую фазу окись углерода.

Естественно, что увеличение продолжительности периода кипения абсолютно не разрешает задачи освобождения металла от газовых включений, а замедленное выгорание окиси углерода, наоборот, понижая упругость избыточной окиси углерода ухудшает условия освобождения металла от находящихся в нем газов.

То же самое относится к шлаковым включениям, эмульсированным в процессе кипения в металле. Эмульсированные частички шлака начинают успешно коагулировать лишь при успокоении ванны и при условии достаточной ее жидкоподвижности. Естественно, что увеличением длительности периода кипения достигнуть лучшего освобождения металла от шлаковых включений попросту нельзя.

Как и всякий мутный раствор, металлическая ванна может освободиться от включений лишь при условии ее успокоения и некоторой выдержки в печи. Однако при изготовлении среднеуглеродистых сортов стали такая выдержка возможна лишь в том случае, если дальнейшее выгорание углерода за счет закиси железа будет прекращено. В печах, работающих на низком проценте чугуна в шихте, такое прекращение выгорания углерода из металла может быть достигнуто путем закрытия воздушного шибера и прикрытия газового клапана (для создания восстановительной атмосферы).

В печах же, работающих рудным процессом, эта мера уже почти ничего не дает, и для действительного прекращения выгорания углерода и успокоения ванны необходимо быстро и резко уменьшить

тем или иным путем концентрацию в ней железных окислов. Эта задача полностью согласуется с рядом других, как-то:

1) прекращение дальнейшего окисления железа в закись и, следовательно, понижения выхода металла;

2) повышение выхода металла за счет использования железа, находящегося в шлаке, путем восстановления его из закиси и, наконец,

3) раскисление металла путем увода из него в шлак закиси железа при условии уменьшения концентрации закиси железа и в шлаке.

На практическом способе осуществления этой задачи мы остановимся ниже, в главе о раскислении шлака.

При рассмотрении вопроса о связи продолжительности кипения металла с его качеством следует иметь в виду, что все наши рассуждения относительно сокращения периода кипения ванны действительны лишь при условии достижения в печи той же температуры выпуска, что и при более длительном кипении ванны. Сокращение периода кипения за счет получения более низкой температуры ванны при выпуске, кроме вреда, ничего не принесет.

Итак, резюмируя, мы приходим к следующим выводам: качество металла связано лишь с его активностью в период кипения и длительностью выдержки в печи при нейтральной или восстановительной атмосфере и при раскисленных шлаках. Для оценки качества металла существенна не продолжительность кипения металла, а его активность (жидкоподвижность) в процессе кипения и относительная раскисленность. Сокращение продолжительности кипения ванны при условии достижения тех же температур ванны вполне разумно, причем оно позволяет вести процесс или с той же скоростью выгорания углерода, но при более низких значениях углерода в металле по расплавлению или при относительно большей скорости выгорания углерода. Вопросу о том, что следует предпочесть, посвящена следующая глава.

4. ИНТЕНСИВНОСТЬ ОБЕЗУГЛЕРОЖИВАНИЯ МЕТАЛЛА В МАРТЕНОВСКИХ ПЕЧАХ

Чтобы получить нормально изготовленную сталь в сравнительно короткий срок, мало обеспечить достаточное количество углерода в металле в конце расплавления. Нужно еще гарантировать нормальную скорость выгорания углерода и в период кипения. Слишком малая, так же, как и слишком значительная, скорость выгорания углерода ведет в периоде кипения к тем же последствиям, что и в периоде расплавления.

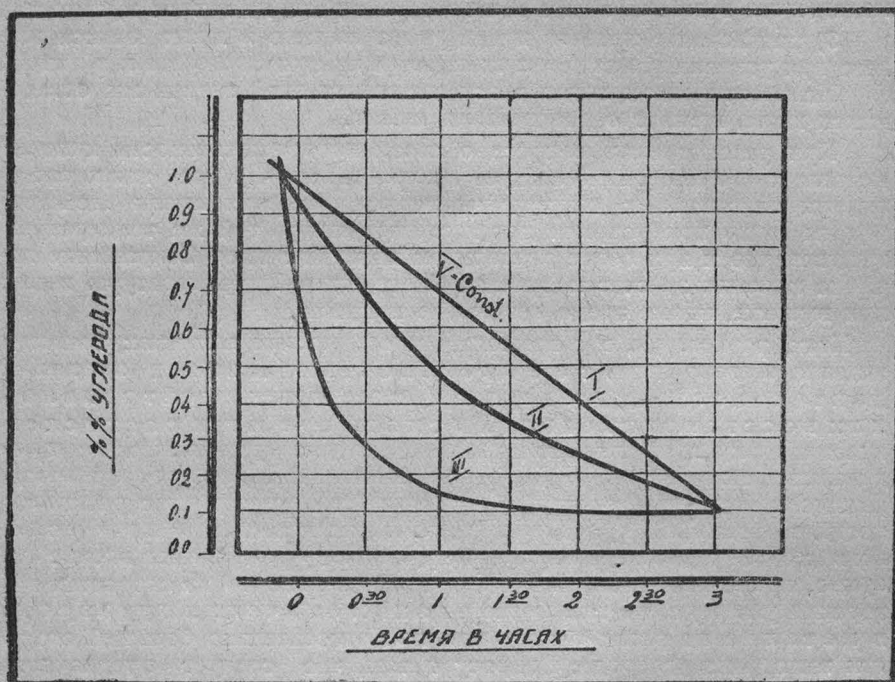
Мысленно можно представить себе три различных варианта кризиса горения углерода при одном и том же нормальном содержании углерода в металле по окончании расплавления.

Эти три варианта представлены на фиг. 5. Первый из них обеспечивает так называемое равномерное выгорание углерода — концентрация его в металле изменяется по закону прямой линии.

Резко противоположный случай представляет вариант III, в котором углерод быстро выгорает вслед за расплавлением шихты и, за-

тем, концентрация его до конца плавки изменяется в очень незначительной степени.

Промежуточный случай представлен кривой типа II. Какой же из этих типов кривых представляется наиболее целесообразным?



Фиг. 5. Три типа кривых выгорания углерода в ванне мартеновской печи

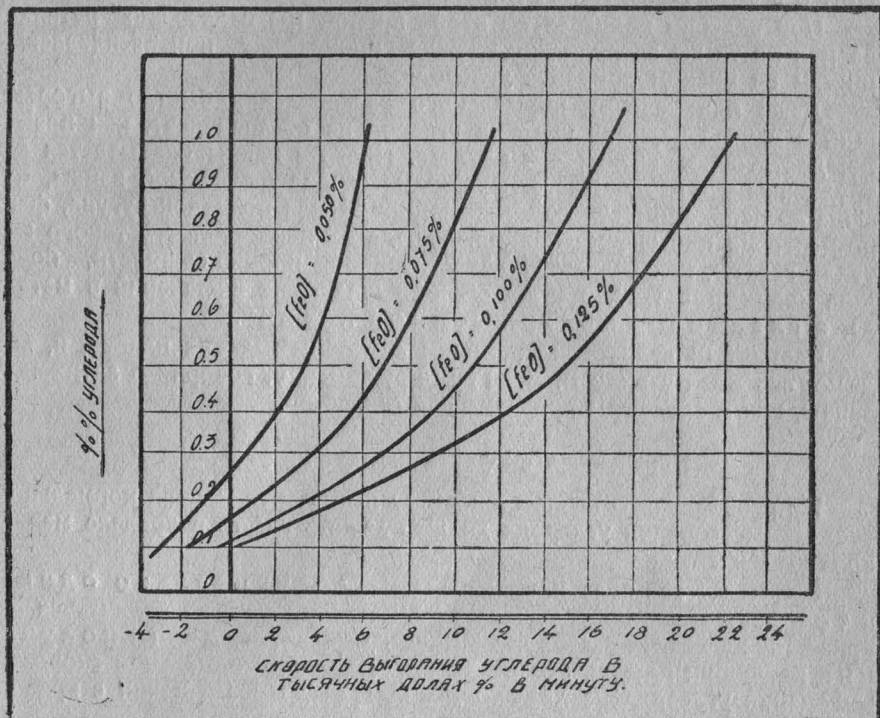
Равномерное выгорание углерода

Скорость горения углерода, исходя из закона действующих масс, выражают, обычно, следующей формулой:

$$V = K_1 [\text{FeO}] [\text{C}] - K_2 \cdot P_{\text{CO}}$$

Согласно исследованиям Н. Schenck'a, W. Riess'a и Е. Brüggemann'a константы K_1 и K_2 не обнаруживают какой-либо зависимости от температуры и зависят главным образом от содержания углерода в металле. С уменьшением содержания углерода в металле значение обеих констант возрастает, причем возрастание K_2 весьма незначительно в то время, как увеличение K_1 достигает в интервале 1—0 проц. С, примерно, 100 проц. При постоянном значении парциального давления окиси углерода $P_{\text{CO}} = \text{Const} = 1,1$ атм. из формулы следует, что при изменении концентрации углерода по закону прямой, т. е. при условии $V = \text{Const}$ содержание закиси железа в металле, обеспечивающей соответствующую скорость выгорания углерода, должно непрерывно возрастать по ассимптотической кривой.

Такие кривые возрастания содержания FeO в металле при определенной скорости горения углерода нанесены на фигуру 6, причем при построении их были использованы скоростные константы выше-



Фиг. 6. Кривые содержания в металле закисы железа, обеспечивающей соответствующие скорости выгорания углерода в ванне мартеновской печи

упомянутых авторов, а расчет кривых производился для каждой данной скорости по формуле Шенка:

$$[\text{FeO}] = \frac{V + K_2 P_{\text{CO}}}{K_1 \cdot [\text{C}]}$$

Из диаграммы следует, что любая скорость выгорания углерода, если она только постоянна, требует обязательного увеличения закисы железа в металле по мере уменьшения концентрации углерода.

Такое увеличение может быть достигнуто:

- 1) заброской руды в печь;
- 2) освобождением закисы железа шлака из ферритов кальция при заброске на шлак динасового или шамотового боя;
- 3) введением на шлак железосодержащих бокситов;
- 4) сильным поднятием температуры в печи и т. д.

Однако во всех случаях это увеличение FeO в металле к концу процесса в одинаковой степени невыгодно, ибо противоречит задаче раскисления металла к концу процесса, и, поэтому, совершенно очевидно, что выгорание углерода по кривой типа I — нерационально.

Ускоренное выгорание углерода

Противоположный разобранным случаям схематически нанесен на фиг. 5 в виде кривой типа III.

При ведении процесса по этой кривой мы неизбежно наталкиваемся на те же затруднения, какие происходят при расплавлении шихты на низком проценте углерода.

Даже при условии нормального расплавления быстро выгорающих в начале периода кипения углерод не обеспечивает, как правило, достаточной активности металла. Прогрев ванны оказывается затрудненным. Отсюда быстрое успокоение еще ненагретой ванны, отсюда — необходимость подогревающих металл подсадок чугуна, ферро-марганца или ферро-силиция, отсюда — насыщенность такого металла газами, как результат недостаточной прокипяченности, большое количество трудно всплывающих шлаковых включений в металле, а главное — потеря темпов плавки.

Вариант III является наихудшим способом ведения плавки, и, видимо, его имел в виду В. Е. Грум-Гржимайло, говоря о затихании ванны, как о зловещем признаке для сталевара.

Нормальная скорость выгорания углерода

Из разобранных выше становится ясным, что кривая нормальной скорости выгорания углерода должна лежать где-то в пределе между кривой I и III.

При поддержании ванны на сравнительно одном и том же уровне по содержанию FeO она должна отличаться от кривой I, изгибаясь в сторону абсцисс. Однако, ради неполучения замякших плавок, это искривление кривой нормальной скорости выгорания углерода не должно доводиться до совмещения с кривой типа III.

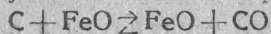
Очевидно, рациональнее всего в этих противоречивых условиях строить процесс по кривой с непрерывно изменяющейся, по своей величине, скоростью горения углерода, — от какого-то максимального и до какого-то определенного минимального значения. Такая кривая должна иметь вид гиперболы и соответствовать двум условиям:

- а) непереоислению ванны закисью железа,
- б) постепенному убыванию скорости выгорания углерода к концу периода кипения.

Переменное значение скорости выгорания углерода зависит, как это уже указывалось выше, главным образом, от концентраций [C] и [FeO].

Возможность же непереоокислять ванну при все уменьшающемся в ней количестве углерода может иметь место лишь при более или менее постоянном значении [FeO] в период выгорания углерода.

Исходя из этого, изучим изменение скорости реакции



при условии уменьшения углерода в металле от начальной концентрации его в ванне (при расплавлении) = 1 проц. и до получения мягкой стали с концентрацией $C = 0,1$ проц., причем каждый раз при соответственно ином значении [FeO].

Кинетика реакции окисления углерода

При наличии в металле $[\text{FeO}] = 0,05$ проц. и содержании C в нем $= 1$ проц. C , скорость реакции окисления углерода по формуле:

$$V = K_1 \cdot [\text{FeO}] [\text{C}] - K_2 P_{\text{CO}},$$

подставляя константы Н. Schenck'a, W. Riess'a и Е. Brüggemann'a, составит: $V = 0,220 \cdot 0,05 \cdot 1,0 - 0,00466 = 0,0063\% \text{ C}$.

Подсчитанные аналогичным путем скорости реакции окисления углерода в процентах в минуту для различных значений $[\text{FeO}]$ и $[\text{C}]$ собраны в таблицу 2 и по данным ее построены кривые фиг. 7. (см. стр. 18).

Таблица 2

Скорость выгорания углерода в проц./мин. в зависимости от содержания $[\text{C}]$ и $[\text{FeO}]$ в металле:

$[\text{C}] \backslash [\text{FeO}]$	0,050	0,075	0,1000	0,125
1,0	0,0063	0,0118	0,0173	0,0228
0,9	0,0057	0,0109	0,0162	0,0214
0,8	0,0052	0,0102	0,0152	0,0202
0,7	0,0046	0,0094	0,0141	0,0189
0,6	0,0041	0,0087	0,0132	0,0177
0,5	0,0033	0,0075	0,0117	0,0158
0,4	0,0022	0,0057	0,0093	0,0129
0,3	0,0008	0,0037	0,0066	0,0095
0,2	-0,0009	0,0012	0,0033	0,0053
0,1	-0,0030	-0,0019	-0,0009	0,0002

Изучение последних приводит к заключению, что увеличение концентрации $[\text{FeO}]$ при высоких значениях $[\text{C}]$ в два раза, вызывает соответствующее увеличение скорости реакции V приблизительно в три раза. С уменьшением содержания углерода в металле эта разница становится еще большей.

Из кривых следует также, что при очень низком значении $[\text{FeO}]$ равновесие между C и FeO наступает при сравнительно высоком значении $[\text{C}]$ в результате чего кипение ванны может прекратиться еще при достаточном содержании в металле углерода.

Полученные выше данные позволяют перейти к построению диаграмм выгорания углерода во времени.

Предположив во всех случаях начальную концентрацию углерода при расплавлении металла $= 1\% \text{ C}$, допустим, что окисление его происходит в условиях постоянства концентрации $[\text{FeO}]$. Тогда скорость реакции будет изменяться только в зависимости от $[\text{C}]$.

Отложив на оси абсцисс — время (фиг. 8), а на оси ординат — процентное содержание углерода, учитываем, что при $[\text{FeO}] = 0,05\%$ и $[\text{C}] = 1,0\%$ средняя скорость реакции:

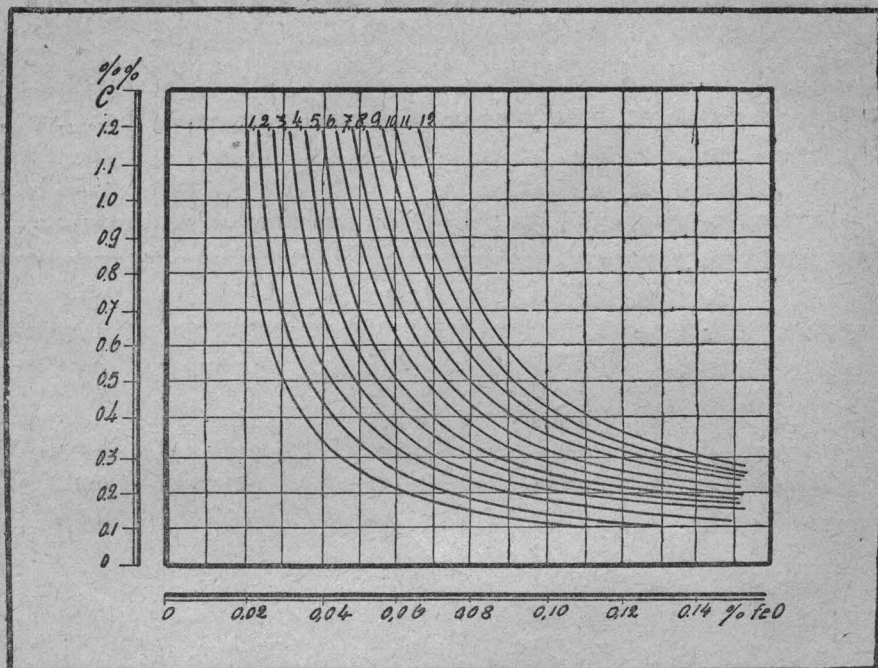
$$V = 0,0063\% \text{ C/мин.}$$

Считая, что за десять минут окислится приблизительно:

$$C = 0,063\%,$$

получим содержание его в металле через десять минут, равное:

$$1,0 - 0,063 = 0,937\% C.$$



Фиг. 7. Изменение скорости реакции $FeO + C \rightleftharpoons Fe + CO$ в зависимости от содержания в металле C и FeO

При $C = 0,937$ проц. скорость окисления углерода будет уже иной, а именно:

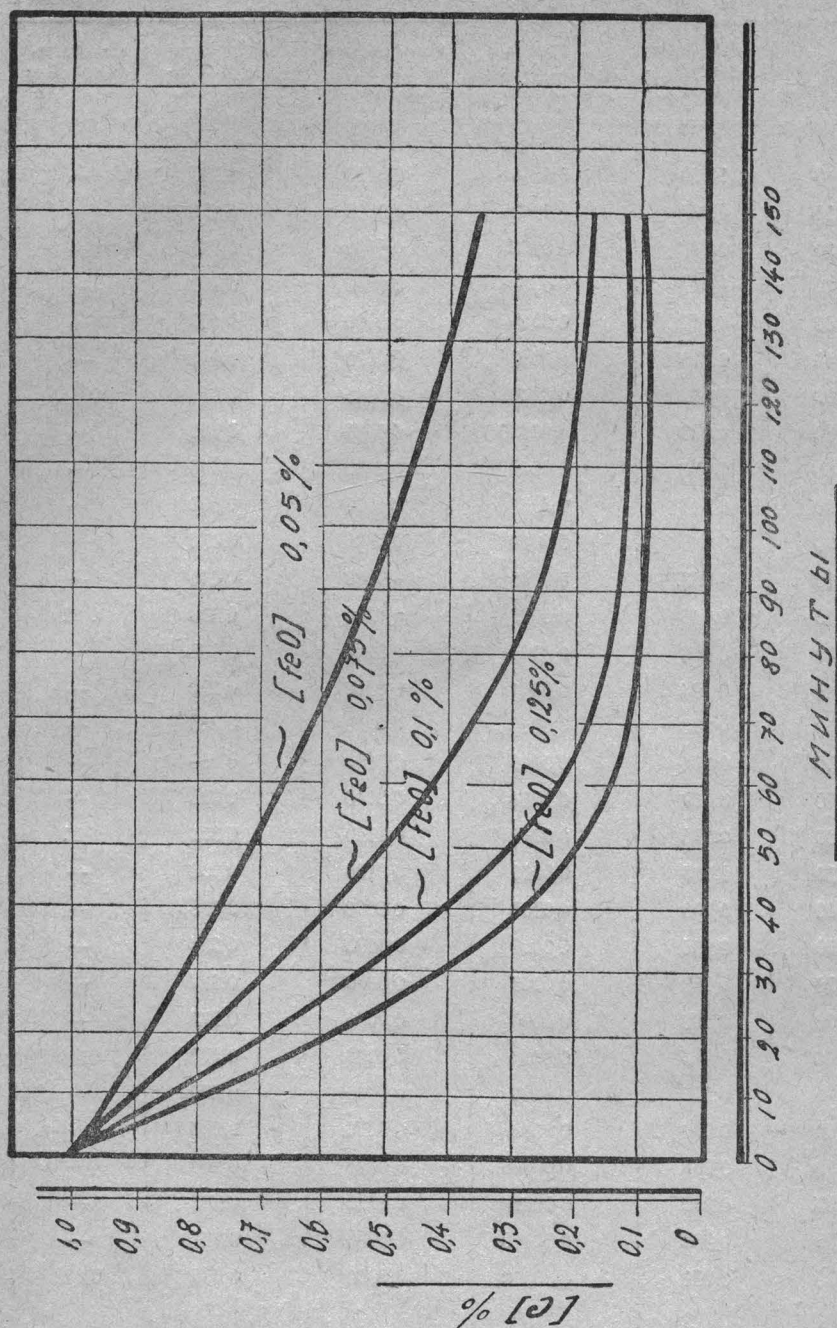
$$V = 0,00595\% C/\text{мин.}$$

и, следовательно, в течение последующих десяти минут углерода окислится еще 0,0595 проц., откуда содержание его в металлической ванне через двадцать минут после начала расплавления окажется равным:

$$0,937 - 0,0595 = 0,878\% C.$$

Подобным образом были рассчитаны таблицы 3, 4, 5, 6, по которым построены кривые окисления углерода, соответствующие различным концентрациям $[FeO]$ (фиг. 8 см. стр. 19).

Эти подсчеты позволяют ориентировочно определить время, необходимое для окисления углерода жидкого металла в мартеновской печи при соответствующих концентрациях в нем $[FeO]$ и $[C]$.



Фиг. 8. Теоретические кривые выгорания углерода во времени в зависимости от содержания в металле FeO

[FeO] = 0,05%

Таблица 3

Время в минутах	Исходная концентра- ция % С	Скорость окисления % С/мин.	Окислилось в течение 10 мин.	Конечная концентра- ция % С	Скорость окисления % С/час
0	1,000	0,0063	0,0630	0,937	—
10	0,937	0,00595	0,0595	0,878	—
20	0,878	0,0056	0,0560	0,822	—
30	0,822	0,0053	0,0530	0,769	—
40	0,769	0,0050	0,0500	0,719	—
50	0,719	0,0047	0,0470	0,672	—
60	0,672	0,00445	0,0445	0,628	0,37
70	0,628	0,00425	0,0425	0,586	—
80	0,586	0,0040	0,0400	0,546	—
90	0,546	0,0037	0,0370	0,509	—
100	0,509	0,0034	0,0340	0,475	—
110	0,0475	0,0030	0,0300	0,445	—
120	0,445	0,0027	0,0270	0,418	0,21
130	0,418	0,0024	0,0240	0,394	—
140	0,394	0,0021	0,0210	0,373	—
150	0,373	0,0018	0,0180	0,355	—
160	0,355	0,0016	0,0160	0,339	—
170	0,339	0,0014	0,0140	0,325	—
180	0,325	0,0012	0,0120	0,313	0,11
190	0,313	0,0010	0,0100	0,303	—
200	0,303	0,0008	0,0080	0,295	—
210	0,295	0,0007	0,0070	0,288	—
220	0,288	0,0006	0,0060	0,282	—
230	0,282	0,0005	0,0050	0,277	—
240	0,277	0,0004	0,0040	0,273	0,04
250	0,273	0,0003	0,0030	0,270	—
260	0,270	0,0003	0,0030	0,267	—
270	0,267	0,00025	0,0025	0,265	—
280	0,265	0,00020	0,0020	0,263	—
290	0,263	0,00020	0,0020	0,261	—
300	0,261	0,00010	0,0010	0,260	0,013

[FeO] = 0,075 %

Таблица 4

Время в минутах	Исходная концентра- ция % С	Скорость окисления %/мин.	Окисляется в течение 10 минут	Конечная концентра- ция % С	Скорость окисления углерода % С/час
0	1,000	0,0118	0,118	0,882	—
10	0,882	0,0108	0,108	0,774	—
20	0,774	0,0100	0,100	0,664	—
30	0,664	0,0091	0,091	0,573	—
40	0,573	0,0085	0,085	0,488	—
50	0,488	0,0073	0,073	0,415	—
60	0,415	0,0060	0,060	0,355	0,65
70	0,355	0,0048	0,048	0,307	—
80	0,307	0,0038	0,038	0,269	—
90	0,269	0,0028	0,028	0,241	—
100	0,241	0,0022	0,022	0,219	—
110	0,219	0,0017	0,017	0,202	—
120	0,202	0,0012	0,012	0,190	0,17
130	0,190	0,0009	0,009	0,181	—
140	0,181	0,0006	0,006	0,175	—
150	0,175	0,0004	0,004	0,171	—
160	0,171	0,0003	0,003	0,168	—
170	0,168	0,0003	0,003	0,165	—
180	0,165	0,0002	0,002	0,163	0,027

[FeO] = 0,100 %

Таблица 5

Время в минутах	Исходная концентра- ция % С	Скорость окисления % С/мин.	Окисление в течение 10 минут	Конечная концентра- ция % С	Скорость окисления углерода % С/час
0	1,000	0,0183	0,183	0,817	—
10	0,817	0,0153	0,153	0,664	—
20	0,664	0,0138	0,138	0,526	—
30	0,526	0,0121	0,121	0,405	—
40	0,405	0,0093	0,093	0,312	—
50	0,312	0,0069	0,069	0,243	—
60	0,243	0,0047	0,047	0,196	0,804
70	0,196	0,0033	0,033	0,163	—
80	0,163	0,0018	0,018	0,145	—
90	0,145	0,0010	0,010	0,135	—
100	0,135	0,0006	0,006	0,129	—
110	0,129	0,0003	0,003	0,126	—
120	0,126	0,0001	0,001	0,125	0,071

Таблица 6

$$[\text{FeO}] = 0,125\%$$

Время в минутах	Исходная концентра- ция % С	Скорость окисления % С/мин.	Окисляется в течение 10 мин.	Конечная концентра- ция % С	Скорость окисления % С/час.
0	1,000	0,0228	0,228	0,772	—
10	0,772	0,0198	0,198	0,574	—
20	0,574	0,0173	0,173	0,401	—
30	0,401	0,0129	0,129	0,272	—
40	0,272	0,0083	0,083	0,189	—
50	0,189	0,0047	0,047	0,142	—
60	0,142	0,0022	0,022	0,120	0,88
70	0,120	0,0012	0,012	0,108	—
80	0,108	0,0006	0,006	0,102	—
90	0,102	0,0002	0,002	0,100	—
100	0,100	0,0002	0,002	0,098	—
110	0,098	0,0002	0,002	0,096	—
120	0,086	0,0001	0,001	0,095	0,025

Время, необходимое для фришевания ванны

Хотя расчет таблиц (3, 4, 5, 6) и не доведен до момента наступления полного равновесия между С, FeO и CO, но он заканчивался нами при достижении фактического прекращения выгорания углерода. Из таблиц следует, что при наличии в металле $[\text{FeO}] = 0,05$ проц. мягкую сталь получить вообще не представляется возможным, так как практическое равновесие ванны наступает уже $\sim$ при 0,3 проц. С, а теоретически оно соответствует $\sim 0,25$ проц. С.

При этом, чтобы получить сталь с 0,3 проц. С при такой низкой концентрации закисы железа в ванне, необходимо затратить на процесс более трех часов. В течение первого часа при этом углерод окисляется со скоростью 0,37 проц. С/час, второго — только 0,21 проц. С/час, третьего — 0,11 проц. С/час, четвертый и пятый же часы почти вовсе не сказываются на изменении в содержании углерода в ванне: 0,04 проц. С/час и 0,01 проц. С/час.

При наличии в металле $[\text{FeO}] = 0,075$ проц. (таблица 3), практически углерод нетрудно окислить до содержания его в металле

— 0,16 проц. С, на что требуется затратить три часа, из которых последний час дает очень небольшое изменение в содержании углерода: от 0,19 до 0,16 проц.

Снизить концентрацию углерода до 0,12 проц. практически можно уже при содержании FeO в металле — 0,100 проц. (таблица 4), причем для достижения такой концентрации достаточно только около полутора часов.

Наконец, до 0,10 проц. С можно довести содержание его в ванне при наличии в металле 0,125 проц. FeO , и для этого требуется только восемьдесят минут.

Выбор типа кривой

Из рассмотренного выше следует, что для приготовления среднеуглеродистых сортов стали практически приемлемы все рассмотренные случаи, для изготовления же стали с содержанием углерода порядка 0,1 проц. С пригоден лишь последний случай или случай наличия в ванне еще большей концентрации закиси железа.

Из этого следует, что выбор типа кривой выгорания углерода должен прежде всего сообразоваться с конечным содержанием углерода в металле (по заданию).

Однако этого недостаточно, так как, например, изготовить осевую сталь с содержанием 0,3 проц. С можно пользуясь любым типом кривой.

Если это так, то остается разрешить вопрос о том, какой же из этих типов кривых окажется для данного процесса наилучшим?

В связи со сказанным в первой главе, очевидно, что вопрос этот может быть решен при помощи одного лишь принципа, который и должен ложиться в основу ведения процесса плавки стали в мартеновских печах: продолжительность выгорания углерода должна строго сообразоваться с временем, в течение которого металл в данной печи может быть нагрет от температуры плавления до температуры, при которой он может быть выпущен из печи.

Продолжительность нагревания металла

В различных печах время, требующееся для поднятия температуры металла от температуры плавления до температуры выпуска, весьма различно. Оно зависит от тоннажа, конструкции и тепловой мощности печи, от состава шихты и качества шихтовых материалов, от способа ведения процесса (порядок и система заправки шихты, спуск шлака) и ряда других факторов.

Отсюда совершенно ясно, что удовлетворительный выбор кривой обезуглероживания должен быть произведен на каждом заводе с учетом специфичности его условий, и дать поэтому универсальный график не представляется возможным.

Однако принцип составления такого графика для правильного ведения процесса по мнению автора может и должен быть универсальным.

Поэтому здесь можно лишь только привести пример правильного подхода к вопросу о выборе типа кривой обезуглероживания. Такой пример приводится ниже для 150-тонной мартеновской печи, работающей на садке, состоящей из 75 проц. жидкого чугуна, 8 проц. известняка и 17—20 проц. руды. Процесс на такой печи велся со спу-

ском 4—6 тонн шлака еще до окончательного расплавления ванны. Печь отапливалась смесью доменного и коксового газа калорийностью всего 1800—1900 кал/м³. Примеры относятся к случаям расплавления ванны близко к 1 проц. углерода в ней и к выпуску проведённых вполне нормально плавов на мягкую сталь.

Определение температуры выпуска

Ведение плавки по заранее составленному графику выгорания углерода, сочетающемуся с продолжительностью нагрева металла, требует определения, прежде всего, той температуры, до которой следует нагревать металл в печи, чтобы не иметь никаких неприятностей при разливке металла.

Эта температура не должна быть ниже какого-то определенного предела, определяемого потерями тепла при разливке. Но в то же время температура металла не должна быть и выше этого предела, так как в силу ряда известных сталеплавильщикам затруднений металл не может быть долго выдерживаем в ковше, а будучи залитым при повышенной температуре в изложницу, он застывает с рядом дефектов, портящих качество металла.

Температура выпускаемого металла даже для одной и той же марки стали на различных заводах должна быть различной, в зависимости от величины потерь тепла металлом при разливке его.

Расчет ее можно производить по следующей формуле:

$$t^{\circ} \text{ вып.} = t_0 + \alpha + \beta + \gamma$$

Где $t^{\circ} \text{ вып.}$ — искомая температура, до которой сталь нагревается в печи,

t_0 — температура затвердевания стали,

α — перегрев металла выше t° плавления в $^{\circ}\text{C}$,

β — падение t° металла в ковше до начала разливки,

γ — падение t° металла при заполнении изложниц, с момента начала и до конца разливки.

Температура конца разливки ($t_0 + \alpha$) определяется в зависимости от сорта стали и во всяком случае должна быть на 10—20° выше температуры затвердевания стали. Ряд измерений температур металла при производстве мартеновской и бессемеровской углеродистых сталей (рельсовая, осевая, трубная, мягкая), произведенных автором, позволяют заключить, что температура застывания стали весьма близка к следующим цифрам:

Таблица 7

Содержание углерода в %	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
T° затвердевания $^{\circ}\text{C}$	1445	1450	1450	1460	1470	1480

Приведенные цифры являются средними из многих случаев замеров температуры конца разливки, когда густеющая сталь скорее тянулась, чем разливалась, при заполнении последней изложницы. Температура во всех случаях измерялась оптическими пирометрами системы Hollborn — Kuhlbaum, Wanner, Pyropto, при чем температуры, приведенные в таблице, даны с поправками*.

* Эти температуры весьма близки к приведенным М. Михайловым в его обстоятельной статье, см. „Металлург“, 1934 г., № 3.

В случае разливки кипящей стали температура конца разливки ($t^0 + \alpha$) должна быть выше приведенных в таблице на $30-40^\circ$, чтобы сталь могла в изложнице прокипеть. В этом случае величина α имеет большее значение, чем в предыдущем, и в среднем может быть принята $= 35^\circ\text{C}$, так что температура выпуска определяется уже следующим образом:

$$t^0_{\text{вып.}} = (t_0 + 35) + \beta + \gamma$$

Величины β и γ для каждого завода (тоннажа печи, размеров и конструкции ковша и изложниц, способа разливки и т. п.) легко могут быть получены непосредственным измерением температур металла нормально разливаемых плавов.

Сопоставление величин β и γ , отнесенных к единице времени (падение t^0 металла на одну минуту выдержки в ковше и на одну минуту разливки), указывает постоянно на тем большее значение величины β , чем меньше был прогрев разливочный ковш перед выпуском.

Так, по ряду исследованных под руководством автора плавов, в 150-тонных печах Кузнецкого завода падение T^0 металла в ковше за время транспортировки его к разливочной площадке и за время выдержки составляет в среднем $= 42^\circ$. При средней продолжительности транспортировки и выдержке $= 12$ минутам, падение T^0 в ковше, отнесенное к одной минуте выдержки, составляет:

$$\frac{42}{12} = 3,5^\circ \text{C/мин.}$$

Падение температуры металла за время разливки составляло в среднем $= 26^\circ$, или на 1 минуту разливки:

$$\frac{26}{50} = 0,52^\circ/\text{мин.}$$

Из приведенных цифр следует, что необходимая температура выпуска нормально нагретой спокойной мягкой стали для данного завода составляет:

$$t^0_{\text{вып.}} = 1480 + 20 + 42 + 26 = 1568^\circ \text{C.}$$

Соответствующая же температура для кипящей стали составила бы:

$$t^0_{\text{вып.}} = 1480 + 35 + 42 + 26 = 1583^\circ \text{C.}$$

Измерение температуры металла в печи

Определение времени, потребного на нагрев ванны от температуры плавления до температуры выпуска, зависящего от множества факторов, нетрудно произвести путем замеров температуры металла, зачерпываемого ложкой в печи, тем же оптическим пирометром.

Этот замер лучше производить не в самой ложке после смахивания с нее шлака*, а в момент выливания металла из ложки на плиту (кирпич), направляя объектив пирометра на струю в месте ее смешения с ранее вылитым металлом.

Поправку на разность температуры металла в печи и при сливе с ложки можно получить косвенным путем. Замерив предварительно

* Как это рекомендует М. Михайлов в упомянутой выше работе.

по секундомеру время, истекшее с момента взятия пробы до момента первого определения температуры металла в ложке, сталь медленно выливают из нее, и через определенное количество секунд повторяют отсчет. Разница в этих двух отсчетах температуры, отнесенная к единице времени, и дает возможность приближенного определения поправки на истинную температуру металла в печи, хотя следует помнить, что падение температуры металла в ложке тем больше, чем выше температура, и, следовательно, этот способ косвенного определения дает несколько пониженный результат, так как измеряемая в этом случае разность температур относится к случаю более низких уже по абсолютной величине температур.

Пример:

Интервал времени между взятием металла в ложке и первым замером $t_1 = 14$ сек.

Интервал времени между первым и вторым замером $t_2 = 10$ сек.

Температура металла в ложке по первому замеру (без поправки) $t_1 = 1364^\circ$ то же по второму замеру $t_2 = 1348^\circ$

Падение t металла в ложке в секунду:

$$\frac{1364 - 1348}{10} = 1,6^\circ/\text{сек.}$$

Поправка на t° металла в печи

$$1364 + 1,6 \cdot 14 = 1386^\circ$$

В этом примере проводились температуры, непосредственно замеренные оптическим пирометром. Для перевода на истинную температуру к ним необходимо делать соответствующие поправки.

Подъем температуры металла в печи

Ряд замеров зачерпнутого ложкой металла показывает, что температура его к концу расплавления соответствует $\sim 1400^\circ\text{C}$ (при содержании углерода, близком к 1,0 проц.).

Следовательно, за период кипения спокойный мягкий металл должен быть нагрет на

$$1568 - 1400 = 168^\circ\text{C.}$$

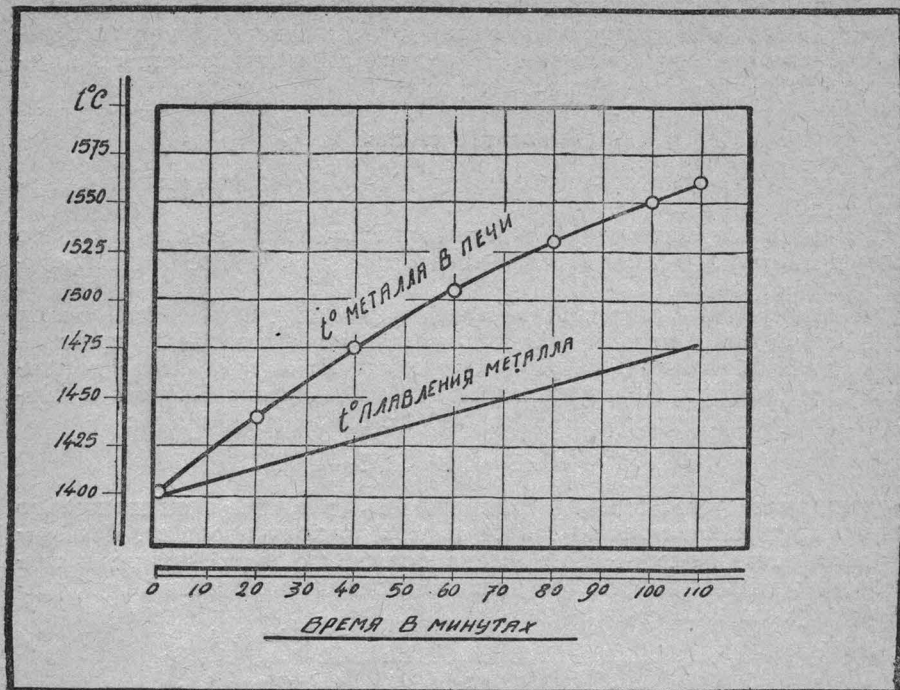
Пробы металла, бравшиеся подобным образом через каждые 20 мин., показали следующие темпы подъема температуры металла в печи (фиг. 9, стр. 27).

Таблица 8

В р е м я		Температура
По расплавлении		1400°C
Через 20 минут		1440°
" 40 "		1475°
" 60 "		1505°
" 80 "		1530°
" 100 "		1550°
" 120 "		1565°

Это дает возможность заключить, что на данной печи с ее конструкцией, шихтой, родом топлива и т. п. при данном режиме изго-

товления спокойной мягкой стали прогреть металл можно в течение ста двадцати минут.



Фиг. 9. Перегрев металла в печи с момента расплавления ванны

Следует еще иметь в виду, что время это может оказаться несколько большим к концу кампании печи, когда ее тепловая мощность окажется несколько пониженной, и, наоборот, оно может быть значительно снижено при более форсированном ходе печи при работе на более высококалорийной* смеси при спуске значительного количества шлака** и т. п.

Пример выбора кривой обезуглероживания

Теперь, располагая всеми данными как в отношении продолжительности фришевания, так и в отношении продолжительности нагрева металла, вернемся к кривым обезуглероживания.

Пусть условия сводятся к тому, чтобы: 1) прогреть металл до 1568°C , на что требуется сто двадцать минут и 2) выпустить сталь с $\sim 0,15$ проц. С. Из фиг. 8 следует, что 0,15 проц. С за сто двадцать минут обеспечивают лишь кривые 3 и 4, причем более удачной в данном случае является кривая типа 3, так как она обеспечивает более или менее интенсивное фришевание ванны в течение всего периода нагрева ванны. Ведение же процесса по кривой типа 4 может повести

*) См. проф. Л. П. Владимиров и инж. Г. Н. Бесхмельницкая — «Теория и практика металлургии», 1937, № 5.

**) См. проф. Л. П. Владимиров — «Шлаковый режим мартеновской плавки», «Сталь» 1937 г. № 12.

к закисанию плавки в силу относительно быстрого выгорания углерода еще до соответствующего поднятия температуры.

Итак, мы делаем вывод, что для рассматриваемого случая наиболее благоприятному ходу процесса должна отвечать кривая обезуглероживания, соответствующая концентрации закиси железа в металле $[\text{FeO}] = \sim 0,100$ проц.

Направляющие кривые

Как практически организовать процесс обезуглероживания в мартеновской печи?

Анализ вышеприведенных данных наталкивает на два пути, по которым можно было бы использовать практически все эти теоретические построения.

Первый путь — это ведение плавки по шлаку. В настоящее время уже разработаны методы экспресс-анализа плавки на FeO применяемые на ряде заводов. Такой анализ отнимает обычно около десяти-двенадцати минут. Пользуясь законом распределения Нернста и константами распределения, изученными Kórbér'ом и Oëlsen'ом:

$$\frac{[\text{FeO}]}{(\text{FeO})} = 5,88 \cdot 10^{-5} \cdot t^{\circ}\text{C} - 0,0793$$

можно, зная состав шлака, поддерживать в ванне приблизительно одинаковую концентрацию закиси железа по ходу процесса. Для этого количество закиси железа шлака должно по мере поднятия температуры ванны убывать, что видно из следующих соотношений, рассчитанных по Kórbér'y и Oëlsen'y:

Таблица 9

$t^{\circ}\text{C}$	$\frac{[\text{FeO}]}{(\text{FeO})}$	$\frac{(\text{FeO})}{[\text{FeO}]}$
1600°	0,0148	67,56
1590°	0,0142	70,43
1580°	0,0136	73,53
1570°	0,0130	76,92
1560°	0,0124	80,64
1550°	0,0118	84,83

Если принять эти величины констант, то для поддержания в ванне, например, концентрации $[\text{FeO}] = 0,1$ проц., в шлаке следовало бы иметь концентрацию свободной закиси железа соответственно (в процентах).

$[\text{FeO}] = 0,100\%$ Таблица 10

$t^{\circ}\text{C}$	$\frac{(\text{FeO})}{[\text{FeO}]}$	(FeO) своб.
1550	84,83	8,48
1560	80,64	8,06
1570	76,92	7,69
1580	73,53	7,35
1590	70,43	7,04
1600	67,56	6,76

Этот путь регулирования процесса был бы весьма прост, если бы не два обстоятельства, препятствующие ему:

1. Распределение FeO между шлаком и металлом в соответствии с константами $K\ddot{o}rber'a$ и $O\ddot{e}lsen'a$ может иметь место лишь при установлении равновесия между шлаком и металлом, чего по ходу плавки быть не должно. Как собственные исследования автора,* так и данные других исследователей показывают, что до тех пор, пока имеет место процесс диффузии FeO из шлака в металл или наоборот, выведенные $K\ddot{o}rber'ом$ и $O\ddot{e}lsen'ом$ соотношения нарушаются.

2. При пользовании этими соотношениями следует помнить, что в шлаке рассматривается не общая, а лишь свободная концентрация закиси железа, определение которой в связи с возможностью образования ферритов и ферратов кальция в жидком шлаке слишком затруднено.

Эти обстоятельства делают указанный способ пригодным лишь для оценки конечных результатов плавки, когда между ванной и шлаком устанавливается действительное равновесие, или когда ванна, по крайней мере, приближается к таковому.

Поэтому практический путь к использованию приведенных выше построений должен быть иным. Действительно, рассматривая кривые фиг. 8, нетрудно представить себе у любой мартеновской печи разграфленную на клеточки доску, с нанесенными на ней заранее двумя-тремя этими эталонными кривыми. Зная тепловую мощность печи, мастер определяет кривую, по которой необходимо вести процесс обезуглероживания, с тем чтобы последний был синхронным с периодом нагрева металла. Пробы металла на углерод, берущиеся через каждые 10—20 минут, позволяя мелком на доске отмечать истинное направление кривой обезуглероживания, в соответствии с которым можно судить об отклонениях от нормали. Естественно, что если процесс обезуглероживания ванны будет замедляться (фиг. 10, см. стр. 33), то это должно означать недостаточную концентрацию железных окислов в ванне, а практически требует внесения в ванну руды и поднятия температуры для усиления диффузии закиси железа в металле. Наоборот, опережение эталонной кривой обезуглероживания означает слишком высокую концентрацию в ванне окислов и требует принятия противоположных мер (см. след. главу).

Таким образом, практически процесс обезуглероживания может быть организован и контролируем по направляющим кривым, заранее установленным для данной печи, ее теплового и шлакового режима и для данного сорта стали.

Как известно, идея ведения мартеновской плавки по направляющим кривым была уже однажды предложена $F. Beitter'ом^{**}$.

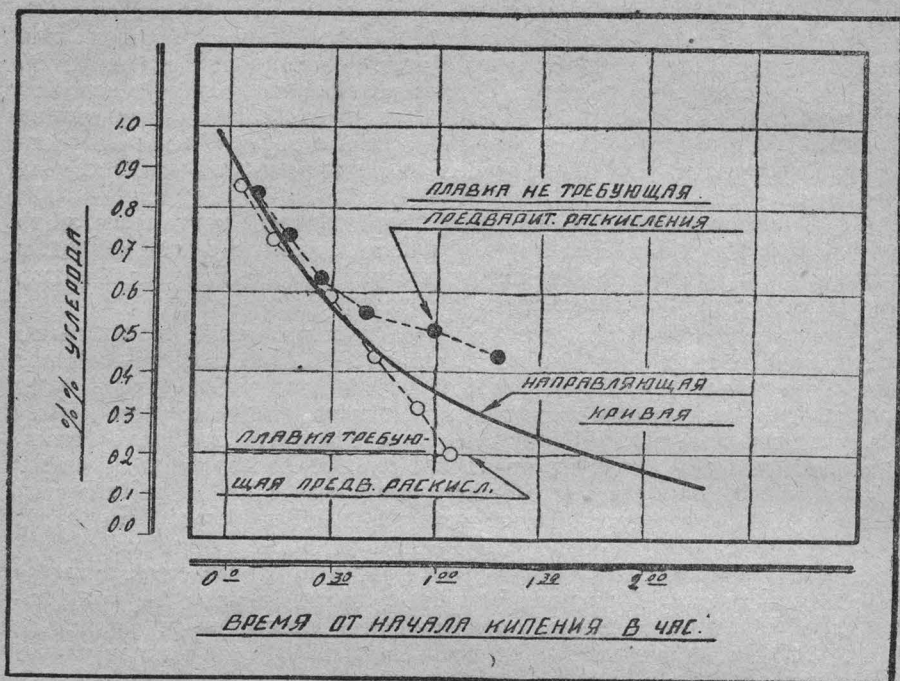
Однако, внесенные $Beitter'ом$ в диаграмму Геренса направляющие кривые не имеют ничего общего с теми логическими построениями, на основании которых были предложены наши кривые (фиг. 8). Кривые $Beitter'a$, по его указанию, являются эмпирическими и построены из расчета выгорания в основной печи 0,22 проц. С в час и в кислой 0,11 проц. в час.

* См. работу автора: Связь между закисью железа и углеродом в ванне мартеновской печи. Труды Сибирского металлургического института, 1937 г.

** Stahl und Eisen, 1933, № 15—16; реф. «Советская металлургия», 1934, № 5—6.

Неприемлемость этих кривых для практических целей следует рассматривать в связи со следующим:

1. Кривые требуют равномерного выгорания углерода во времени, что связано с обязательным повышением содержания в металле FeO к концу процесса и не вызывается практической необходимостью.



Фиг. 10. Примеры отклонения плавов от нормального хода по заданной кривой

2. Кривые не связаны с тем содержанием углерода в металле, с которого начинается процесс кипения металла, что должно привести к чрезвычайному разнообразию и длительности процесса кипения ванны при расплавлении ее на различных количествах углерода в металле.

3. Кривые не сочетаются ни с конструкцией, ни с тепловой мощностью печи и поэтому следование им для термически мощных печей равносильно искусственному снижению их производительности.

Предложенные автором кривые свободны от этих недостатков и поэтому могут быть использованы как для организации, так и для контроля изготовления стали в мартеновских печах, позволяя максимально интенсифицировать процесс в каждом данном случае.

5. О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ МЕТАЛЛА И ШЛАКА

Место протекания реакции

В вопросе повышения интенсивности мартеновского передела не последнее место принадлежит и шлакам. Рассматривая мартеновский процесс как процесс освобождения от примесей чугуна, следует иметь

в виду, что процесс окисления этих примесей связан прежде всего с составом и состоянием шлаков. Так как главным окислителем в основном мартеновском процессе является закись железа, всегда имеющаяся в свободном состоянии в шлаке, то с этой точки зрения небезынтересно будет рассмотреть вопрос о месте протекания реакций окисления примесей и, главным образом, углерода.

Раньше считали, что окисление примесей происходит на границе системы металл-шлак, и поэтому интенсивность окисления примесей ванны считали пропорциональной площади соприкосновения шлака с металлической ванной.

В дальнейшем, с уточнением наших представлений о растворимости окислов в металлах и их сплавах, процесс окисления примесей стали рассматривать уже как результат взаимодействия их с закисью железа, растворенной в металлической ванне. Последняя пропорциональна количеству закиси железа, находящейся в свободном состоянии в шлаке, и подчинена закону распределения Нернста.

Естественно, что интенсивность окисления примесей с этой точки зрения уже не может рассматриваться как величина прямо пропорциональная площади ванны.

Она сохраняет свою зависимость от поверхности ванны лишь постольку, поскольку диффузия FeO из шлака в металл также происходит через эту поверхность.

Но из этого не следует, что в печах с большим зеркалом ванны примеси должны всегда окисляться быстрее, чем в печах с малой поверхностью ванны. При прочих равных условиях примеси ванны могут окисляться быстрее в печи с меньшей площадью ванны, если содержание свободной закиси железа в шлаках ее больше.

Таким образом, условную площадь пода или зеркало ванны нельзя рассматривать как единственный критерий интенсивности окисления примесей в различных печах. В свете этих соображений, путь, которого придерживались в течение долгого времени металлурги, — путь устройства печей с мелкими ваннами нельзя признать вполне целесообразным. Как видим, с точки зрения интенсивности окисления примесей поверхность ванны, а значит и глубина ее играют второстепенную роль. Гораздо большее значение приобретает при наличии свободной закиси железа в шлаке интенсивность диффузии, которая в свою очередь определяется:

- а) температурой ванны и
- б) вязкостью шлака и металла.

Однако согласно теории акад. А. А. Байкова примеси ванны окисляются не закисью железа, растворенной в металлической ванне, а кислородом закиси железа, отщепляющимся от нее при диссоциации. С этой точки зрения интенсивность окисления примесей следует рассматривать уже как функцию степени диссоциации растворенных в ванне окислов.

Но упругость диссоциации окислов прямо пропорциональна концентрации их в металлической ванне и обратно пропорциональна тепловому эффекту их образования.

Так как главным окислителем в основном мартеновском процессе является закись железа, то скорость окисления примесей с точки зрения и этой теории определяется составом шлака и скоростью диффузии FeO из шлака в металл.

Сравнивая эти три точки зрения на процессе окисления примесей металлической ванны в мартеновской печи, следует считать, что они отнюдь не исключают друг друга. Если закись железа растворяется в ванне мартеновской печи и взаимодействует, таким образом, с примесями, то независимо от этого соприкасающийся с металлом шлак на границе системы «металл-шлак» может также окислять примеси ванны, хотя этот род окисления, конечно, не будет господствующим. В свою очередь окисление примесей отщепившимся при диссоциации кислородом может не исключать и реакций замещения, где кислород непосредственно переходит от одной из примесей к другой, если стойкость вновь образуемого окисла окажется большей.

Окисление металла в шлаке

Следует обратить внимание еще на один способ окисления примесей ванны, имеющий место в действительности и часто упускаемый из виду. Это окисление примесей ванны в шлаке. Во время кипения металла поверхность металлической ванны никогда не остается спокойной. В зависимости от скорости выгорания углерода и вязкости металла большее или меньшее количество пузырьков окиси углерода прорывается через металлическую ванну в газовую фазу, увлекая за собой частички металла, вздымая на поверхности его волны кипящей жидкости, интенсивно под давлением газов, выбрасываемой вверх в шлак и напоминающей собою в микроскопическом масштабе солнечные протуберанцы.

Обезуглероживание металла при этом имеет тем большее развитие, чем больше поверхность соприкосновения выбрасываемых в шлак частиц металла со шлаком. Если предположить, что выбрасывание частиц металла в шлак пропорционально только поверхности ванны, то окажется, что размеры выбрасываемых королек, в виде шариков металла, на величину поверхности соприкосновения металла со шлаком влияния не оказывают.

В этом можно убедиться, проделав следующий расчет: на площади $= S^2$ может поместиться один шар с диаметром $d = S$, четыре шара с диаметром $d = \frac{S}{2}$, шестнадцать шаров с диаметром $d = \frac{S}{4}$ и т. д. (см. фиг. 11 стр. 33). Это следует хотя бы из сопоставления площадей проекций этих шаров на плоскость, равных в каждом случае наибольшему сечению указанных шаров или площади круга с диаметром

$$S, \frac{S}{2}, \frac{S}{4} \text{ и т. д.}$$

Действительно, площади проекции этих шаров на плоскость равны соответственно:

$$S' = \frac{\pi \cdot S^2}{4}; S'' = \frac{\pi \cdot S^2}{4 \cdot 4}; S''' = \frac{\pi \cdot S^2}{16 \cdot 4}$$

т. е.

$$S' = 4S'' = 16S'''$$

В то же время суммарная поверхность всех шаров, помещающихся на одной площади независимо от их диаметра остается постоянной.

Действительно, поверхность шара с $d = S$ равна

$$M' = \pi \cdot S^2$$

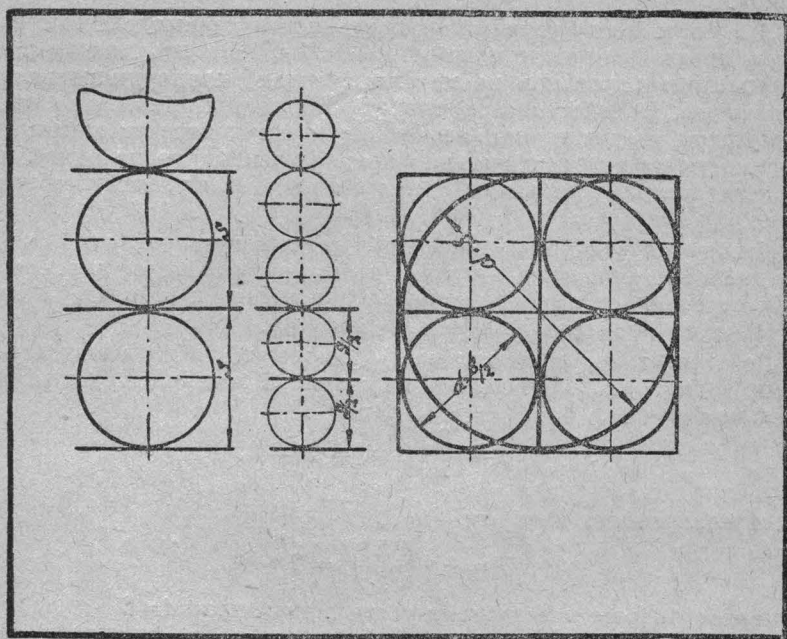
Поверхность шаров с $d = \frac{S}{2}$ и $d = \frac{S}{4}$ соответственно

$$M'' = \frac{\pi \cdot S^2}{4} \text{ и } M''' = \frac{\pi \cdot S^2}{16},$$

$$\text{т. е. } M' = 4M'' = 16M''',$$

но так как на одной и той же площади $= S$ помещается один шар с $d=S$, четыре шара с $d = \frac{S}{2}$ и т. д., то суммарная их поверхность остается неизменной

$$\Sigma M' = \Sigma M'' = \Sigma M'''.$$



Фиг. 11. Схематическое изображение площадей и поверхностей

корольков с диаметром $= \frac{S}{2}$ и $\frac{S}{4}$

Таким образом, если исходить из предположения, что выбрасывание корольков металла в шлак пропорционально поверхности ванны, то независимо от степени раздробления выбрасываемых в шлак корольков металла, поверхность окисления металла увеличивалась бы в одинаковое количество раз. Об этом говорят приведенные ниже подсчеты суммарной поверхности корольков металла, выброшенных с поверхности ванны $= 1 \text{ м}^2$ (табл. 11). Как видим, во всех случаях, независимо от величины корольков, поверхность соприкосновения увеличивается в пятикратном размере, так как, помимо обычного соприко-

Таблица 11

d королька	Площадь сечения мм ²	Число корольков с 1 м ²	Поверхность каждого мм ²	Общ. поверхность в м ²
1 см	78,5	12 738,8	314	4,0
1 мм	0,785	1 273 880	3,14	4,0
0,1 "	0,00785	127 388 000	0,0314	4,0
0,01 "	0,0000785	12 738 800 000	0,000314	4,0
0,001 "	0,000000785	1 273 880 000 000	0,0000314	4,0

сношения ванны со шлаком, мы имеем еще четырехкратное увеличение площади соприкосновения за счет выбрасываемых в шлак корольков.

Однако и такое увеличение поверхности взаимодействия нельзя считать предельным и вот почему. Мы исходили из предположения, что выбрасывание корольков из металла в шлак пропорционально площади ванны. В действительности же оно зависит не только от площади ванны, но пропорционально еще и интенсивности кипения, и в зависимости от последней можно предположить, что из одной и той же части поверхности ванны корольки могут выбрасываться неоднократно.

Исходя из этих предположений, величина поверхности соприкосновения окисляющегося металла со шлаком уже не остается независимой от размеров выбрасываемых шлак частичек металла, а наоборот, обратно пропорциональна их диаметру.

Действительно, если распылить некоторый объем металла на частицы, то из одного объема со стороной S можно получить число корольков с

$$d = \frac{S}{2} : n' = 2^3 = 8,$$

общая поверхность которых

$$\Sigma M'' = 8 \pi \left(\frac{S}{2} \right)^2 = 2 \pi S^2,$$

т. е. вдвое больше поверхности шара с диаметром $d=S$.

Если же металл распылить на большее число корольков со стороной $d = \frac{S}{4}$ то число их будет равно:

$$n''' = 4^3 = 64,$$

а суммарная поверхность

$$\Sigma M''' = 64 \cdot \pi \left(\frac{S}{4} \right)^2 = 4 \pi S^2,$$

откуда

$$\Sigma M' = \frac{1}{2} \Sigma M'' = \frac{1}{4} \Sigma M'''$$

Таким образом, раздробляя металл так, чтобы диаметр корольков уменьшался в n раз, мы тем самым поверхность его окисления увеличиваем в n^3 раз.

Это положение иллюстрирует приведенная ниже таблица 12,

Таблица 12

Диам. корольков см	Площадь сечения см ²	Число корольков в 1 см ³	Поверхность каждого см ²	Общая поверхность м ²
1 см	0,785	1	3,14	3,14
0,1 "	0,00785	1000	0,0314	31,40
0,01 "	0,0000785	1000000	0,000314	314,00
0,001 "	0,000000785	1000000000	0,00000314	3140,00
0,0001 "	0,00000000785	1000000000000	0,0000000314	31400,00
0,00001 "	0,0000000000785	1000000000000000	0,000000000314	314000,00

подсчитанная аналогично вышеприведенной, но с той разницей, что выбрасывание корольков здесь рассматривается не относительно площади ванны, а относительно объема ее верхнего слоя толщиной в один см.

Как видим из таблицы, раздробления одного см³ металла на корольки диаметром в один мм достаточно, чтобы увеличить поверхность окисления этого металла в десять раз.

Приведенные выше соображения показывают, что интенсивность обезуглероживания ванны мартеновской печи в значительной мере зависит от интенсивности кипения ее. Помимо того, что при более интенсивном кипении повышается скорость диффузии закиси железа из шлака в металл и, следовательно, ускоряется процесс окисления углерода закисью железа растворенной в металле, последний усиливается также за счет более интенсивного обмена частицами между шлаком и металлом.

В идеальном случае процесса передела чугуна в сталь можно было бы представить как процесс тесного взаимодействия металла со шлаком в герметически закрытых и подвижных (вращающихся) печах или в печах вертикального типа с осуществлением в них принципа противотока струй металла и шлака. Двукратное пропитывание металла сначала железистыми и затем кислыми кремнеземистыми шлаками позволило бы легко окислить примеси металла, а затем избавиться и от эмульсированной в металле закиси железа.

Однако, осуществлению такого процесса препятствует в настоящее время и качество огнеупорных материалов, из которых выкладываются печи и отопительные устройства, затрудняющие сочетание вращающихся частей печи с неподвижными. Такой процесс относительно легче мог бы быть достижим в электропечах типа Детройт и представляется возможным в недалеком будущем.

Однако независимо от достижения подобного рода идеальных конструкций, процесс плавки в мартеновской печи можно в известной мере приблизить к такому активному взаимодействию шлака и металла путем организации интенсивного кипения во весь период нагревания металла от температуры плавления шихты до температуры выпуска металла из печи. Естественно, что такое усиление активности металла имеет смысл лишь в том случае, если интенсивность нагрева металла не отстает от интенсивности обезуглероживания.

О перемешивании металла

Какими способами может быть повышена интенсивность кипения, при которой имело бы место тесное взаимодействие частиц шлака и металла?

По существу эти способы сводятся к задаче перемешивания металла со шлаком в печи.

Достижимые способы перемешивания могут быть подразделены на две группы: искусственное (механическое) перемешивание и естественное (химическое) перемешивание.

Искусственное перемешивание ванны может быть осуществлено различными путями: введением в ванну стального лома, помешиванием ванны деревянным шестом, наклонением рабочего пространства качающихся печей, равномерной во времени заброской в печь различных материалов и т. д.

При применении деревянного шеста механическое перемешивание сочетается с химическим, так как обгорающее дерево выделяет летучие вещества, а древесина образует пары влаги и окись углерода, которые, проходя через металл, оказывают дополнительное воздействие на его перемешивание.

Естественное перемешивание ванны сводится к перемещению частиц металла из-за разности удельных весов и из-за воздействия на металл образующихся в нем газов.

Так как диффузия закиси железа имеет определенное направление от поверхности металла к поду печи, то в каждый данный момент плавки в верхних слоях металл обезуглерожен в большей степени, чем в нижних. Все обычные примеси стали лишь понижают ее удельный вес и, следовательно, рафинирование металла можно рассматривать как процесс получения металла с большим удельным весом. Получающийся в верхних слоях более тяжелый металл вызывает перемещение более легких и ниже расположенных частиц металла вверх. Этому препятствует несколько и другое обстоятельство — нагрев металла. Так как металл прогревается сверху, то вверх всегда оказываются более легкие частички металла, независимо от различия по химическому составу. Оба этих обстоятельства: изменение химических и физических свойств рафинируемого металла протекают неравномерно и потому — ведут к самопроизвольным перемещениям частиц металла внутри металлургической ванны. Естественно, что факторами, усиливающими эти процессы, могут явиться: температура и наличие закиси железа в шлаках мартеновской печи.

Другой и основной вид естественного перемешивания, это — реакция обезуглероживания с образованием окиси углерода. Объем образующейся во время обезуглероживания металла окиси углерода в печи с 75—80 проц. чугуна в шихте, превышает в 2000—2500 раз объем самого металла. Укорачивая период обезуглероживания, мы тем самым увеличиваем количество окиси углерода, проходящей через всю массу металла в единицу времени, и вызываем более бурное кипение ванны, которое и связано с выбрасыванием металла в шлак. Последнее в свою очередь еще более укорачивает период обезуглероживания благодаря увеличению поверхности соприкосновения металла со шлаком.

В основе этого увеличения поверхностей соприкосновения лежит, таким образом, скорость реакции взаимодействия углерода металла с

растворенной в нем закисью железа. Чем больше эта скорость, тем больше шансов на то, что металл будет рафинироваться не только за счет закиси железа растворенной в металлической ванне, но и непосредственно за счет закиси железа шлака, а это для интенсификации процессов рафинирования уже весьма существенно.

Интенсификация обезуглероживания за счет окисления металла в шлаке

Производственные эксперименты подтверждают правильность приведенных соображений. Еще семнадцать лет тому назад на факт окисления металла в шлаке обратили внимания Whiteley и Hallimond. Измеренные ими количества королек металла, заглупавшихся в шлаке кислой плавки, представлены в табл. 13.

(Измерение производилось методом магнитной сепарации).

Таблица 13

Периоды плавки	Колич. королек жел. в шлаке в % от веса шлака
Расплавление (крупн. шарики)	12,0
Перед кипением (мелкие шарики)	0,5
Кипение	5,0
После кипения ($C = 0,25\%$)	0,1
Выпуск металла ($C = 0,15\%$)	0,1

Наибольшее количество королек металла в шлаке в период расплавления Whiteley и Hallimond объяснили повышенной вязкостью еще ненагретого шлака. По мере нагрева последнего количество королек в нем падает, а в связи с усиливающимся кипением снова увеличивается.

Хотя в кислом процессе из-за повышенной вязкости шлака можно было бы ожидать и большего содержания королек в шлаке, тем не менее эффективность окисления их, из-за отсутствия достаточных количеств свободной закиси железа в шлаке, оказывается меньшей. Это можно заключить из сравнения данных Whiteley и Hallimond с данными F. Pacher'a, относящимися уже к основному мартеновскому процессу.

Сравнивая содержание углерода в металлической ванне и в выбрасываемых в шлак корольках, Whiteley, Hallimond получают следующие данные:

Таблица 14

Пробы	1	2	3	4	5
Углерод в металле	2,11	1,99	1,36	0,80	0,56
" в корольках	1,76	1,72	1,26	0,75	0,56

F. Pacher для обоих видов процесса приводит следующий результат исследования:

Таблица 15

Процесс	Пробы	C	Si	Mn	P	S
кислый . .	металла	0,86	0,05	0,06	0,031	0,049
	корольков	0,91	0,06	0,04	0,043	0,045
основной . .	металла	0,15	сл.	0,23	0,017	0,035
	корольков	0,03	сл.	0,23	0,017	0,042

Приведенные данные показывают, насколько значительнее эффект выбрасывания корольков металла в шлак при основном процессе. В то время как, по данным Pacher'a, Whiteley и Hallimond'a, для кислого процесса с уменьшением содержания углерода в металле разница между углеродом металла и корольков становится все менее значительной, а при 0,8 — 0,5 проц. С уже сводится почти к нулю. для основного процесса эта разница остается весьма ощутительной еще при 0,15 проц. С, и металл при таком низком содержании углерода обезуглероживается в шлаке вплоть до 0,03 проц.

Исследуя процесс обезуглероживания на ряде мартеновских плавок, проведенных в 150-тонной основной мартеновской печи, автор задался побочной целью выяснить эффективность окисления корольков металла выбрасыванием в шлак при различной интенсивности кипения ванны.

Некоторые результаты еще незаконченного исследования приведены в табл. 16. В ней собраны отдельные данные, относящиеся к трем различным плавкам, проведенным на 150-тонной печи, с различной интенсивностью выгорания углерода.

Таблица 16

№ №	Характер кипения Факторы	Бурное кипение	Обычное кипение	Вялое кипение
1	Максимальное количество корольков в % к весу шлака	19,4	16,8	7,3
2	Тоже при выпуске металла из печи	1,3	0,90	0,96
3	Углерод в ванне в период кипения C_m	0,53	0,51	0,65
4	Тоже в корольках C_k	0,16	0,18	0,27
5	Отношение $\frac{C_m}{C_k}$	3,32	2,83	2,40

Таблица иллюстрирует чрезвычайно важное значение изучаемого фактора — выбрасывания корольков металла в шлак — для интенсивности обезуглероживания металла в печи. Естественно, что выбрасывание корольков в шлак связано с некоторой потерей железа, но эта потеря определяется не столько интенсивностью выбрасывания корольков металла в шлак, сколько периодом выдержки металла со шлаком в печи перед выпуском. Таблица 16 показывает, что во всех трех плавках количество корольков, обнаруженных в шлаке, мало разнится между собой, несмотря на различную интенсивность кипения: во всех трех случаях количество корольков в шлаке можно считать повышенным (по сравнению, например, с кислым процессом), что в свою очередь было связано с недостаточностью выдержки металла в печи перед выпуском, диктуемой в свою очередь способом раскисления металла, не допускающим промедления с выпуском после введения в ванну раскислителей.

Разница в содержании углерода в основной массе металла и корольках во всех трех случаях значительна. Она оказалась тем большей, чем интенсивнее шло кипение ванны и чем, следовательно, больше была поверхность соприкосновения металла со шлаком.

Отсюда видно, что мы имеем большие резервы в деле увеличения скорости обезуглероживания металла в мартеновских печах.

Однако всякое повышение интенсивности обезуглероживания должно быть согласовано с одновременным повышением темпов нагрева металла в печи. Поскольку в больших печах темпы нагрева металла часто уступают темпам обезуглероживания его, то возникает задача максимального сокращения периода нагрева металла. Отсюда необходимость в повышении температуры заливаемого в печь жидкого чугуна. Для этого должны быть предприняты меры к уменьшению потерь тепла чугуном при выпуске его из доменной печи и транспортировке в миксер. С этой точки зрения предпочтительнее окажутся миксеры с хорошо преющими горелками или даже форфришеры. Повышению скорости нагрева металла будут способствовать также увеличение скорости поступающих в печь газа и воздуха, принудительное дутье и искусственная тяга, своевременный и достаточный спуск шлака и достаточная калорийность газов, но в наибольшей степени этому будет способствовать высокая разность температур между газом и шлаками, что в свою очередь требует пристального изучения вопроса о замене динасовых сводов более огнеупорными и термостойкими.

6. О ПРЕДВАРИТЕЛЬНОМ РАСКИСЛЕНИИ МЕТАЛЛА

За последние годы в практике мартенования получил распространение способ так называемого предварительного раскисления металла. Этот способ заключается в введении в ванну во время кипения ее раскисляющих добавок, главным образом, низкопроцентного ферросилиция. Последний как бы «промывает» ванну от содержащейся в ней закиси железа, подготавливая таким образом полное раскисление ванны.

Способ этот занесен к нам из Германии, где известное распространение получили также методы ведения плавки по направляющим кривым Байтера. Последние, как уже выяснилось в главе четвертой, ведут к неминусовому повышению к концу плавки содержания закиси железа в металлической ванне. В этом случае предварительное раскисление, конечно, может иметь определенный смысл, сокращая расход дорогих раскисляющих добавок и время, потребное на раскисление металла.

Однако у нас этот способ был перенят многими производственными без надлежащего критического рассмотрения его в применении к условиям практики. У нас предварительное раскисление металла имеет место часто и там, где вовсе нет никакого равномерного выгорания углерода, и даже там, где углерод, наоборот, весьма медленно выгорает в конце периода кипения, что связано с замедленным периодом нагрева металла.

Действительно, обратим снова внимание на фиг. 5 и 8. Если нами выбрана определенная кривая выгорания углерода, в основу которой положена неизменная концентрация закиси железа в металлической ванне, и если действительная скорость выгорания углерода отличается от принятой кривой, то вопрос о целесообразности предварительного раскисления должен быть решен в зависимости от направления фактической кривой выгорания углерода. Если взятые пробы металла показывают более ускоренное выгорание углерода, чем это предполагалось направляющей кривой, то это значит, что

ванна насыщена окислами железа в большей степени, чем это требуется для установленного хода процесса. Естественно, что наиболее благоразумным будет в данном случае ввести в ванну соответствующие раскисляющие добавки, с тем чтобы количество закиси железа ванны довести до требуемой нормы.

Но представим противоположный случай — случай более медленного выгорания углерода, чем это предположено направляющей кривой, при наличии в ванне еще достаточного количества углерода. Такой случай практически означал бы недостаточное количество в ванне окислов железа. Очевидно, не нужно теперь никаких доказательств того, что было бы бессмысленным в таком случае вводить в ванну раскисляющие добавки ради предварительного раскисления. А вместе с тем этот вопрос для многих авторов статей и даже книг, повидимому, не совсем ясен.

Предварительное раскисление ванны следует рассматривать, таким образом, не как обязательную составную часть процесса плавки, а как прием, позволяющий в отдельных случаях скорее и с большим эффектом добиться выпуска металла хорошего качества из печи. Естественно, что при недостатке в ванне железных окислов такой прием не только не ускориł бы процесса, но, наоборот, создал бы дополнительные трудности к его успешному завершению.

Каким же образом представляется возможным по ходу плавки устанавливать целесообразность или нецелесообразность предварительного раскисления?

Очевидно, единственный и наиболее удобный путь для этого — это ведение плавки по тем же направляющим кривым, сопоставление действительных результатов для которых с намеченными и дает возможность делать заключение о целесообразности такого приема.

Однако выше мы установили несомненную желательность непрерывного кипения ванны в течение всего периода прогрева металла. Это требует наличия закиси железа в ванне печи в течение всего периода кипения ванны. Отсюда задача предварительного раскисления ванны расходится с задачей непрерывного его кипения. Является вопрос, нельзя ли вовсе отказаться от предварительного раскисления ванны?

Повидимому, отказ от предварительного раскисления ванны мог бы иметь смысл лишь при условии, что раскисление металла могло бы происходить довольно быстро, независимо от наличия в ней окислов железа и при незначительном расходе дорогих добавок, повышающих стоимость металла.

Решению этого вопроса, позволяющего вовсе отказаться от предварительного раскисления ванны, посвящена следующая глава.

7. О РАСКИСЛЕНИИ МЕТАЛЛА И ШЛАКА

В настоящее время существует три различных принципа раскисления металлической ванны:

- 1) раскисление собственно металла,
- 2) раскисление шлака и
- 3) эмульсирование шлака в металл.

Первые два основаны на введении в металл или, соответственно, в шлак элементов-восстановителей, оказывающих химическое воздействие на окислы, растворенные в этих жидкостях. Третий способ основан не на процессе восстановления окислов а на принципе образо-

вания сложных нерастворимых соединений между кислыми и основными окислами, растворенными в шлаке и металле при их тесном взаимодействии.

Наихудшим способом обескислороживания ванны является наиболее распространенный способ раскисления собственно металла. При введении в ванну металлических добавок кислород из закисы железа переводится в другие соединения — окислы, которые частично снова растворяются в металле, частично же, вследствие меньшей их растворимости, диффундируют в шлак, не всегда, однако, успевая всплыть до выпуска металла из печи. Раскисление ванны, таким образом, просто не достигает цели, тем более, что при малейшей задержке металла в печи после его раскисления закись железа шлака моментально усиливает диффузию в металл, благодаря понижению ее концентрации в металле. То же происходит частично и в ковше, когда выпущенный и раскисленный в печи металл покрыт слоем нераскисленного шлака.

Блестящие перспективы открывает перед сталелитейным производством третий принцип раскисления ванны. Промышленные опыты оздоровления металла шлаком по методу Точинского у нас и потому же методом Перрена во Франции дали блестящие результаты. Эти методы связаны, однако, с потребностью некоторого изменения производственной схемы процесса, вызывая необходимость в устройстве дополнительных агрегатов.

Независимо от решения этой задачи значительный шаг вперед может быть сделан в мартеновском производстве при отказе от непосредственного раскисления металла в пользу раскисления шлака.

Действительно, раскисляя шлак, мы не вводим в металл раскисляющих добавок и, следовательно, не только не вызываем в металле образование новых окислов, но и предохраняем металл от возможного запыжнения связанными в добавках газами и т. п. Раскисляя не металл, а шлак, мы устраняем возможность диффузии закисы железа из шлака в металл, что обычно имеет место при введении в ванну раскислителей. Раскисляя не металл, а шлак, мы имеем возможность применять более дешевые добавки и, следовательно, удешевить процесс раскисления. Раскисляя шлак, мы повышаем выход металла за счет освободившегося железа шлака и частично за счет восстановившейся закисы железа, растворенной в металле, причем увеличение выхода достигает величины порядка 1,5 — 2,0 проц.

Раскисляя шлак, а не металл, мы имеем возможность выдержать плавку в печи для отстаивания металла от находящихся в нем неметаллических включений, не боясь дальнейшего окисления углерода и железа.

Раскисление шлака может быть достигнуто любым восстановителем, окисел которого имеет более низкую, чем закись железа, упругость диссоциации. Во Франции для этой цели применялся порошок ферро-силиция, в Германии был применен так называемый боркальк, содержащий до 60 проц. алюминия. Наводка на шлак этих материалов позволяла в течение нескольких минут доводить содержание закисы железа шлака до 1—3 проц., а в результате, вследствие резко усиливающейся диффузии, понижалось и содержание закисы железа в металле до требуемых размеров. Это последнее не связано, таким образом, со свойствами вещества, применяющегося для раскисления шлака, а зависит исключительно от того количества желез-

ных окислов, которое остается в результате раскисления шлака, и от жидкоплавкости и температуры металла, обуславливающих скорость диффузии закиси железа в шлак.

Количество остающейся в шлаке после раскисления закиси железа зависит не только от температуры и упругости диссоциации окисла элемента-восстановителя, но еще и от способа введения данного восстановителя в шлак.

Выбор восстановителя и способ введения его в шлак следует решать не изолированно, а в связи с рядом других задач, стоящих перед сталеплавильщиком в конце плавки в мартеновской печи, к рассмотрению которых и перейдем.

8. КОМБИНИРОВАННЫЙ СПОСОБ ДОВОДКИ СТАЛИ В МАРТЕНОВСКОЙ ПЕЧИ

Конец плавки ставит перед мастером следующие задачи:

- 1) увести из металла серу;
- 2) не допустить обратного восстановления фосфора из шлака в металл;
- 3) обеспечить пункты первый и второй, не загущая сильно шлаки;
- 4) получить шлак с минимальным количеством в нем закиси железа и
- 5) раскислить металл.

Для выполнения этих требований в печь вводятся обычно различные материалы, причем ввод их совершается в различное время и при помощи различных приемов.

Естественно, что задача интенсификации мартеновского процесса выдвигает вопрос об установлении единого комбинированного метода доводки углеродистых сталей, который в состоянии был бы удовлетворить одновременно всем поставленным требованиям.

Решая эту задачу, автор пошел по пути изготовления специального материала, введение которого в различных количествах и обеспечило бы выполнение поставленных условий.

В процессе лабораторных опытов удалось разрешить основные требования, которые были поставлены автором при изготовлении такого материала. Эти требования сводились к следующим:

1. Материал должен содержать те вещества, которые могут обеспечить раскисление шлака, его разжижение, обессеривание и обесфосфоривание.
2. По физическим свойствам материал должен быть удобным для заброски в печь, не должен быть пылеватым и при раздроблении должен не рассыпаться, а раскалываться.
3. Процесс изготовления такого материала должен быть возможно прост, не должен требовать установки специального оборудования и отнимать большого количества времени.
4. Все составляющие такого материала должны быть возможно более дешевы.

Все эти требования получили благоприятное разрешение, и использовать такой материал для доводки стали может любой завод, имеющий любую мартеновскую печь.

Материал для доводки стали по способу автора назван им «боксо-коксом».

В состав боксо-кокса входят отсев коксика, обожженная известь, боксит и смола.

Вместо дорогого алюминия, примененного в Германии для раскисления шлака, в боксо-кокс введен почти ничего не стоящий отходный материал — коксовая отсевка. Хотя окись углерода имеет и более высокую упругость диссоциации, чем окись алюминия, тем не менее она ниже, чем, например, у кремния при тех температурах стали, при которых производится раскисление ее. Это дает возможность с успехом использовать углерод кокса для таких целей, как восстановление закиси железа шлака. Однако для успешного восстановления железных окислов шлака коксик следует не задавать на поверхность его, как поступают во Франции с ферро-силицизм, а погрузить каким-либо путем в шлак. Для этого коксик нужно утяжелить. Естественно, что утяжелить коксик можно лишь в сочетании с какими-либо другими материалами, имеющими больший удельный вес. Такими материалами могут оказаться известь, необходимая для повышения основности шлака, и боксит, примененный ради разжижения его.

Применение известняка в конце плавки следует считать не только нецелесообразным, но и недопустимым, так как это ведет к ненужному охлаждению ванны. Получение же высокоосновных шлаков является необходимым и не всегда выдерживаемым условием борьбы с вредными примесями в ванне мартеновской печи, и так как кипение стали невозможно вести на густых шлаках, то получение высокоосновных шлаков приурочивается к концу плавки, когда при более высокой температуре легче увести в шлак серу. Поэтому боксо-кокс заводится на обожженной извести в сочетании с бокситом, который позволяет получать высокоосновные и в то же время не густые шлаки.

Применение боксита, а не плавикового шпата вызвано большей дешевизной боксита и отсутствием явлений раз'едания футеровки при его введении в печь.

Некоторое количество железных окислов, вводимых с бокситом в печь, легко будет восстановлено избыточным количеством углерода кокса, вносящимся с ним же. Обычно же введение боксита в конце плавки в ванну является нежелательным, из-за повышения концентрации закиси железа.

Наконец, применение смолы обусловлено необходимостью связать все вводимые материалы. При этом высокое содержание углерода в последней позволяет использовать смолу одновременно и как химический реагент.

С целью получения твердого, кусковатого и в то же время вязкого материала, автором были испробованы различные шихты, причем наилучший результат показала следующая смесь материалов:

- 1 весовая часть боксита,
- 2 весовых части извести,
- 3 весовых части воды,
- 4 весовых части смолы и
- 6 весовых частей кокса.

При таком соотношении материалов боксо-кокс имеет одно чрезвычайно ценное свойство — он оказывается самозатвердевающим и сохраняющимся в таком виде в течение нескольких лет. Приготовленные автором два года тому назад образцы лишь увеличили свою твердость и дробятся при сильном ударе не рассыпаясь, а раскалываясь на части.

Приготовление боксо-кокса производится следующим образом: в неглубокий ящик всыпается отмеренное количество обожженной извести (лучше слегка подогретой), которая заливается водой. Вспучивающаяся, гасящаяся известь перемешивается до получения жидковатой кашицы, в которую всыпается дробленый коксик в смеси с порошкообразным бокситом. Смесь перемешивается до получения однородной густоватой массы серо-шоколадного цвета, после чего, не прекращая перемешивания, на смесь выливают предварительно подогретую смолу. Последняя придает смеси эластичность, делая ее похожей на замазку. По получении полной однородности ящик со смесью оставляют в покое на три-четыре часа, предварительно нарубив лопатой линии разлома боксо-кокса на отдельные кирпичики. Через несколько часов масса оказывается настолько затвердевшей, что пригодна к употреблению.

Смешение массы, конечно, лучше производить в специальных смесителях, типа малаксеров, а для дробления боксита необходимо задалживать и бегуны, обычно имеющиеся в распоряжении мартеновских цехов. Никакого другого обрудования боксо-кокс не требует.

Заброску в печь боксо-кокса следует производить тогда, когда проба металла показывает приближающееся к заданному содержанию углерода. Количество подающегося в печь воздуха при этом несколько сбавляется, чтобы печь работала на восстановительном пламени, заслонки печи плотно прикрываются, и боксо-коксу дают возможность в течение пятнадцати-двадцати минут воздействовать на шлак и металлическую ванну, после чего по пробам металла на углерод и шлака на закись железа судят о возможности выпуска металла из печи.

Таким образом, комбинированный способ доводки металла позволяет свести в одну операцию ряд приемов, что упрощает работу по обслуживанию печи, уменьшает возможность промахов и ошибок при доводке стали, сокращает потерю тепла печью за счет сокращения числа открываний и закрываний заслонок на загрузочных окнах и, естественно, экономит самое ценное — время.

Материал, с помощью которого осуществляется этот способ доводки, может быть изготовлен как в самом мартеновском цехе, так и вне его. Получить его очень легко — он не требует ни прессов, ни печей (подобно боркальку), ни дорогостоящих добавок. Все его составляющие имеются, как правило, в любом мартеновском цехе.

Этот материал устраняет вредное влияние порошковой извести на свод и торцевые стенки печи, так как при применении его, вместо извести, в печь вводят твердые куски боксо-кокса. Он открывает новые пути для использования отбросных продуктов — отсева коксика, угля и смолы для ответственных целей.

Заменяя (иногда частично) дорогостоящие раскислители, этот материал позволяет получить прекрасный, не загрязненный неметаллическими включениями металл.

Этот же материал дает возможность смело интенсифицировать процесс изготовления стали в печи во все периоды плавки, не боясь последствий в смысле увеличения угара железа в шлак или в смысле повышения концентрации закиси железа в металлической ванне.

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ
обозначенного здесь срока

12/1				
13/1				

Тип. им. Котлякова.

Цена 2 р.

1р